



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE

INSTITUTO DE FÍSICA

**Distribuição de ^{137}Cs em Árvores Frutíferas
Tropicais**

Bernardo Nepomuceno Pinto Mosquera

Dissertação apresentada ao Instituto de Física da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências.

Orientador:

Prof. Dr. Roberto Meigikos dos Anjos

**Niterói
2004**

À minha incrível e adorada esposa Carla

Agradecimentos

Concretizar este grandioso trabalho, que iniciou há dois anos, representa uma verdadeira vitória para mim. Na verdade, é a conquista de um título: O título de *mestre* em ciências.

Confesso que não teria chegado aqui sozinho. Por isso reservo este espaço para agradecer a todos que contribuíram para que este trabalho fosse concluído. Em particular, gostaria de citar alguns nomes que considero muito especiais.

Agradeço aos meus pais Leila e Pedro Mosquera e a minha irmã Flávia Mosquera, pelas palavras de incentivo e amor.

Agradeço ao meu orientador Roberto Meigikos por ser, muitas vezes, mais do que orientador. Ao Alessandro Facure pela participação na coleta das amostras utilizadas neste trabalho e aos companheiros do LARA, Rodrigo Veiga e Leonardo Mangia, que, entre outras coisas, sempre me ajudaram a preparar amostras e interpretar os dados.

Agradeço a CAPES pelo apoio financeiro.

E, por fim, agradeço aos meus amigos Daniel Grimm, Bernardo Coutinho, Fábio Lima, Christiano Timbó e as minhas amigas Renata Zocatelli e Suenne Machado pelas noites anti-stress de quinta-feira na Cantareira.

Resumo

Foram feitas medidas das concentrações de ^{137}Cs em duas goiabeiras, uma mangueira e um abacateiro com o objetivo de verificar estudar o transporte e a distribuição deste radionuclídeo em árvores frutíferas tropicais.

Diagramas bi-dimensionais da distribuição radial de ^{137}Cs no tronco principal serão apresentados. Serão feitas, também, comparações com as distribuições longitudinal e radial de ^{40}K para estas mesmas árvores.

Os resultados apresentados neste trabalho confirmam o que já é conhecido na literatura sobre o transporte e distribuição de sais em árvores frutíferas, onde a atividade específica de ^{137}Cs é maior nas partes mais jovens destes vegetais tropicais: frutas, folhas, brotos entre outras. Por outro lado, foi observado que a distribuição radial de ^{40}K apresenta um nível de saturação para altos valores da concentração de ^{137}Cs . Desta forma, diferentemente para o ^{137}Cs , a absorção de ^{40}K é regulada ou limitada por algum mecanismo.

Vale ressaltar que os diagramas bi-dimensionais da distribuição radial de ^{137}Cs mostram resultados mais precisos que os convencionais diagramas unidimensionais, revelando nenhum comportamento simétrico ou homogêneo em todos os anéis de crescimento.

Abstract

The concentrations of ^{137}Cs were measured from guava, mango and avocado trees, with the aim to verify how this radionuclide is transported and distributed along the tropical fruit trees.

Bi-dimensional diagrams of the radial distribution of ^{137}Cs in the main trunk are also presented. Comparisons with a few longitudinal and radial distributions of ^{40}K for these trees were performed.

The results confirm the present knowledge on the transport and distribution of salts in fruit trees, where the specific ^{137}Cs activity is higher in the growing parts of these trees: fruits, leaves, needles, twigs and the outer growth layers. On the other hand, it was observed that ^{40}K radial distribution exhibits saturation for high values of ^{137}Cs concentration. Thus, unlike for ^{137}Cs , ^{40}K absorption is regulated or limited by some mechanism.

In addition, the bi-dimensional diagrams of the ^{137}Cs radial distribution show more accurate results than the conventional one-dimensional diagrams, disclosing no symmetrical or homogeneous behaviors of the specific activity on either of the tree rings.

“Tem gente que passa a vida inteira travando a inútil luta com os galhos, sem saber que lá no tronco que está o coringa do baralho”

Raul Seixas

Índice

Capítulo 1: Introdução	14
Capítulo 2: Materiais e Métodos	18
2.1 A Coleta das Amostras.....	19
2.2 A Preparação das Amostras.....	23
2.3 Arranjo Experimental.....	27
2.3.1 A Blindagem.....	28
2.3.2 O Detector NaI(Tl).....	28
2.3.2.1 Funcionamento.....	29
2.3.3 Propriedades do Detector e a Calibração em Energia.....	33
2.3.3.1 Resolução em Energia.....	33
2.3.3.2 Eficiência de Detecção.....	35
2.4 A Aquisição e Análise de Dados.....	36
2.4.1 Calibração em Energia e a Identificação dos Radionuclídeos....	37
2.4.2 Determinação da Atividade e Estimativa de Incertezas.....	38
2.4.3 Limites de Detecção.....	40
Capítulo 3: Aspectos Relevantes na Literatura	43
3.1 Modelos de Distribuição Vertical de ¹³⁷ Cs no Solo.....	44
3.1.1 Solo Não Perturbado.....	45
3.1.2 Solos Cultivados.....	48
3.2. Taxas de Transferências.....	50
3.3 Distribuição de Radionuclídeos em Vegetais.....	55
3.3.1 Distribuição Radial.....	55
3.3.2 Distribuição Longitudinal.....	59
Capítulo 4: Resultados e Discussões	63
4.1 Distribuição Vertical de ¹³⁷ Cs no Solo.....	64

4.2 Fator de Transferência.....	67
4.3 Distribuição Radial.....	69
4.4 Distribuição Longitudinal.....	79
4.5 Comparação entre ^{137}Cs e o ^{40}K	89
Capítulo 5: Conclusões.....	92
Referências Bibliográficas.....	96

Índice de Figuras

- Figura 2.1:** Ilustração do lote onde foram coletadas as amostras analisadas neste trabalho, indicando as posições onde eram cultivados abacateiros (**A1**, **A2** e **A3**), mangueira (**M**) e goiabeiras (**G1**, **G2** e **G3**).....20
- Figura 2.2.** Ilustração da goiabeira **G1**. a) Vista total da árvore com a identificação do galho que foi analisado neste trabalho; b) Identificação das posições onde foram colhidos as amostras de caules, galhos, folhas e frutos; c) Identificação das posições das amostras coletadas no tronco principal.....21
- Figura 2.3.** Ilustração da goiabeira **G2**. a) Vista total da árvore com a identificação do galho que foi analisado neste trabalho; b) Identificação das posições onde foram colhidos as amostras de caules, galhos, folhas e frutos; c) Identificação das posições das amostras coletadas no tronco principal.....21
- Figura 2.4.** Ilustração do abacateiro **A1**. a) Vista total da árvore com a identificação do galho que foi analisado neste trabalho; b) Identificação das posições onde foram colhidas as amostras de caules, galhos, folhas.....22
- Figura 2.5.** Ilustração da mangueira **M**. a) Vista total da árvore com a identificação do galho que foi analisado neste trabalho; b) Identificação das posições onde foram colhidas as amostras de caules, galhos, folhas.....22
- Figura 2.6:** a) Fotografia de um dos discos da goiabeira **G2**; b) Visualização dos anéis que foram identificados para esta amostra e; c) Cortes realizados no disco para o preparo de várias amostras para um dado anel de crescimento..26
- Figura 2.7:** Ilustração do arranjo experimental utilizado no LARA. O detector, os módulos eletrônicos e a placa de aquisição de dados foram adquiridos da EGG & ORTEC. Os códigos apresentados em cada componente representam o modelo utilizado. A blindagem foi confeccionada no LARA.....27
- Figura 2.8:** Ilustração do funcionamento de um detector de NaI(Tl) e dos principais tipos de interações que ocorrem em seu interior: efeito fotoelétrico, espalhamento Compton e produção de pares [Ortec, 1984].....30
- Figura 2.9:** Ilustração do processo de espalhamento Compton [Knoll,1979]....31
- Figura 2.10:** Ilustração do processo de Absorção Fotoelétrico [Knoll, 1979]....32
- Figura 2.11:** Espectro de energia de uma amostra padrão (contendo ^{137}Cs e ^{40}K) obtido durante 1 hora no arranjo experimental utilizado neste trabalho (detector de NaI(Tl)).....33
- Figura 2.12:** Exemplos de espectros de energia para detectores com resoluções em energia boa e ruim [Knoll,1979].....34
- Figura 2.13:** Definição da resolução em energia de um detector em função da largura a meia altura.....34

Figura 2.14: Reta de calibração em energia utilizada neste trabalho.....	38
Figura 2.15: (a) Ilustração da curva de uma distribuição Gaussiana e seus respectivos desvios padrões. Em (b), a sobreposição de duas distribuições (fundo e amostra) [HASL300, 1997].....	40
Figura 3.1: Distribuição vertical de ^{137}Cs tipicamente exponencial em solos não perturbados [Quine, 1991,Walling, 1990b]. A curva vermelha apresenta um ajuste de uma função exponencial.....	45
Figura 3.2: Exemplos típicos de distribuição vertical de ^{137}Cs em diferentes tipos de solos: (a) argilas e sedimentos; (b) sedimentos; (c) argila; (d) areia e sedimentos e; (e) areia [Quine, 1992]. As curvas vermelhas representam funções matemáticas que melhor ajustam os dados experimentais.....	46
Figura 3.3: Distribuição vertical do tipo exponencial para solos não cultivados com diferentes graus de contaminação de ^{137}Cs [Quine, 1994]. As curvas vermelhas representam funções matemáticas que melhor ajustam os dados experimentais.....	48
Figura 3.4: Distribuição vertical de ^{137}Cs em solos cultivados [Quine, 1994]. As curvas vermelhas representam ajustes da Equação 3.3 utilizando $b = 0$, enquanto que as curvas azuis representam ajustes utilizando a Equação 3.3, mas com $b \neq 0$. Quanto maior for o valor de b , mais acentuado será o decaimento da distribuição.....	49
Figura 3.5: Distribuições verticais de ^{137}Cs típicas em terrenos com diferentes tipos de ocupação.....	49
Figura3.6: Gráficos da distribuição de ^{137}Cs e $^{239+240}\text{Pu}$ nos anéis de crescimento em Nagasaki, Japão. A linha pontilhada azul representa o ano de 1945, quando houve a explosão da bomba em Nagasaki [Kudo, 1993].....	56
Figura 3.7: Gráfico da distribuição radial de céσιο (linha azul), estrôncio (linha verde) e da atividade específica (SA) de estrôncio radioativo por estrôncio estável (pontilhado vermelho) em duas espécies de árvores da família das coníferas: (a) Red Spruce e (b) Eastern Hemlock [Momoshima, 1994].....	57
Figura3.8 : Gráficos da distribuição radial de ^{137}Cs e de ^{40}K no interior do mesmo tronco de uma árvore [Kudo, 1993].....	57
Figura 3.9: Fotografias de uma seção reta de um tronco de uma árvore da família das coníferas. Pode-se observar com clareza a simetria dos anéis etários [Grissino, 2004].....	58
Figura 3.10: Gráficos da distribuição de ^{134}Cs nas partes de uma árvore. A figura (a) representa a distribuição quando a contaminação se dá através do solo. Em (b) a contaminação se dá através das folhas [Carini, 1997].....	60

Figura 3.11: Gráficos da distribuição de ^{85}Sr nas partes de uma videira de uvas. A figura (a) representa a distribuição quando a contaminação se dá através das folhas. Em (b) a contaminação se dá através do solo [Carini,1997].....	61
Figura 3.12: Gráficos da concentração de radionuclídeos em tomates para diferentes tipos de contaminação [Sabbarese, 2002].....	62
Figura 4.1: Gráficos das distribuições verticais de ^{137}Cs no solo. Em (a) está o perfil de solo para a goiabeira (G1); em (b) da goiabeira (G2); em (c) da mangueira (M) e em (d) o perfil do abacateiro (A1).....	64
Figura 4.2: Foto da camada de entulho contaminado por ^{137}Cs a poucos centímetros da superfície do terreno estudado.....	66
Figura 4.3: Gráficos bidimensionais da distribuição radial de ^{137}Cs na goiabeira (G1). A figura (a) ilustra o disco mais alto (Disco 2), enquanto (b) o mais próximo ao solo (Disco 1).....	71
Figura 4.4: Gráficos das distribuições radiais dos discos da goiabeira (G2). As letras de (a) até (e) ordenam os discos do mais alto para o mais baixo.....	71
Figura 4.5: Gráfico da distribuição radial de ^{137}Cs no interior do tronco da goiabeira (G2). Este é o Disco 1 do caule principal, que fica mais próximo ao solo.....	73
Figura 4.6: Gráficos da distribuição radial de ^{137}Cs no interior do tronco da goiabeira (G2). Estes são os discos 2 e 3 do caule principal.....	74
Figura 4.7: Gráfico da distribuição radial de ^{137}Cs no interior do tronco da goiabeira (G2). Estes são os Discos 4 e 5 do caule principal, os mais altos em relação ao solo.....	75
Figura 4.8: Gráficos da distribuição radial de ^{137}Cs no interior dos anéis de crescimento da goiabeira (G1). As concentrações do radionuclídeo são dadas em Bq.kg^{-1} . O disco 1 está mais próximo da superfície do solo.....	76
Figura 4.9: Ilustração das concentrações de ^{137}Cs nos anéis de crescimento de três dos cinco discos da goiabeira (G2).....	77
Figura 4.10: Ilustração das posições das amostras radiais do abacateiro (A1). Este disco possuía cerca de 5 cm de diâmetro. A tabela ao lado mostra os valores das concentrações de ^{137}Cs em Bq.kg^{-1} para cada amostra do tronco 1 do abacateiro.....	78
Figura 4.11: Ilustração das amostras radiais da mangueira (M). Este disco possuía cerca de 6 cm de diâmetro. A tabela ao lado mostra os valores das concentrações de ^{137}Cs em Bq.kg^{-1} para cada amostra do tronco 3 da mangueira.....	78

- Figura 4.12:** Gráficos bidimensionais das concentrações de ^{137}Cs nos discos da goiabeira (G2). Esta figura ilustra a distribuição longitudinal do radionuclídeo. A figura é apresentada em ordem decrescente de altura do disco em relação ao solo.....80
- Figura 4.13:** Gráficos bidimensionais das concentrações de ^{137}Cs nos discos da goiabeira (G1). Esta figura ilustra a distribuição longitudinal do radionuclídeo.....81
- Figura 4.14.** Concentrações de ^{137}Cs e ^{40}K para os quatros anéis de crescimento do disco 2 da goiabeira (G2). Os índices A, B, C e D representam os anéis e os valores (+) indicam o lado esquerdo do anel e os valores (-) indicam o lado direito do anel. O representa o centro do disco.....82
- Figura 4.15.** Concentrações de ^{137}Cs e ^{40}K para os quatros anéis de crescimento do disco 2 da goiabeira (G1). Os índices A, B, C e D representam os anéis e O, o centro do disco.....84
- Figura 4.16:** Ilustração da goiabeira (G1). As letras azuis de A até J indicam as regiões onde foram coletadas as amostras de folhas e frutos. Os números de 1 até 34 indicam as regiões onde foram coletadas as amostras de tronco. Os valores das concentrações de ^{137}Cs podem ser vistos na Tabela 4.3.....86
- Figura 4.17:** Ilustração das posições das amostras vegetais da goiabeira (G2). As letras azuis de A até F indicam as regiões onde foram coletadas as amostras de folhas e frutos. Os números de 1 até 25 indicam as regiões onde foram coletadas as amostras de tronco.....87
- Figura 4.18:** Ilustração das posições das amostras vegetais da mangueira (M). As letras azuis de A até E indicam as regiões onde foram coletadas as amostras de folhas e frutos. Os números de 1 até 14 indicam as regiões onde foram coletadas as amostras de tronco.....88
- Figura 4.19: (a)** Concentrações de ^{137}Cs e ^{40}K para os quatros anéis de crescimento do disco 2 da goiabeira (G2). Os índices A, B, C e D representam os anéis e os valores (+) indicam o lado esquerdo do anel e os valores (-) indicam o lado direito do anel. O representa o centro do disco. Em **(b)**, as concentrações de ^{137}Cs e ^{40}K para os quatros anéis de crescimento do disco 2 da goiabeira (G1). Os índices A, B, C e D representam os anéis de crescimento da árvore.....90
- Figura 4.20:** Concentrações de ^{137}Cs e ^{40}K para as diferentes partes das árvores frutíferas analisadas neste trabalho.....91

Lista de Tabelas

Tabela 2.1. Valores de k para α 's mais comuns.....	40
Tabela 3.1: Fatores de Transferência de ^{137}Cs para alguns frutos [Carini, 2001].....	54
Tabela 4.1: Concentrações médias de ^{137}Cs em Bq.kg ⁻¹ de solo seco para as árvores estudadas. As incertezas para as concentrações são representadas pelo desvio padrão da média.....	67
Tabela 4.2: Valores médios das concentrações de ^{137}Cs em frutos e folhas das árvores estudadas e seus respectivos fatores de transferência. As incertezas para as concentrações são representadas pelo desvio padrão da média.....	69
Tabela 4.3: Concentração de ^{137}Cs nas amostras de caule, frutos e folhas da goiabeira (G1), que está ilustrada na Figura 4.14.....	83
Tabela 4.4: Concentração de ^{137}Cs nas amostras de caule, frutos e folhas da goiabeira (G2), que está ilustrada na Figura 4.15.....	85
Tabela 4.5: Concentração de ^{137}Cs em amostras de caule, frutos e folhas da mangueira (M). Esta tabela pode ser visualizada na Figura 4.16.....	86
Tabela 4.6: Concentração de ^{137}Cs em amostras de caule, frutos e folhas do abacateiro (A1). Esta tabela pode ser visualizada na Figura 4.17.....	87
Tabela 4.7 : Valores médios da concentração de ^{137}Cs nas partes jovens e nas partes antigas das árvores estudadas neste trabalho. Os números em azul e vermelho representam as posições das amostras no caule de cada uma das espécies. Estas posições podem ser vistas nas figuras 4.14 a 4.17. Os valores entre parênteses são desvios padrões da média.....	90

Capítulo 1

Introdução

A radioatividade está presente em nosso planeta desde a sua formação. Ela é proveniente de diferentes radionuclídeos e suas respectivas concentrações variam significativamente de lugar para lugar [IAEA, 1983; UNSCEAR, 2000]. Estes elementos radioativos, que podem ser classificados como naturais e artificiais, são comumente encontrados nos gases atmosféricos, nas águas de rios e oceanos, no solo e em rochas, nos seres humanos, em animais e vegetais. Como consequência, os radionuclídeos estão presentes no ar, em alimentos, em bebidas, materiais de construção etc. A radioatividade natural é proveniente tanto de raios cósmicos quanto fontes terrestres. A artificial, entretanto, é originada de fontes construídas pelo homem.

Os radionuclídeos naturais terrestres, em geral, possuem meias-vidas longas, da ordem de centenas de milhões de anos. Potássio (K), urânio (U) e tório (Th) são os mais abundantes e suas concentrações variam para diferentes tipos de solo e de rochas. O decaimento radioativo destes dois últimos elementos apresenta-se na forma de uma série, produzindo juntos mais de 40 radionuclídeos filhos, com meias-vidas variando da ordem de frações de segundos até 10^8 anos.

Os radionuclídeos artificiais têm sido criados desde a descoberta da fissão atômica e do subsequente desenvolvimento de tecnologias de energia e armas nucleares. Entre as décadas de 40 e início de 70, testes e uso de armas

nucleares foram as principais fontes de contaminação radioativa da atmosfera. O subsequente “fallout” destes resíduos radioativos e seus respectivos produtos de fissão foram as principais fontes de liberação de elementos artificiais no meio ambiente, onde os mais importantes produtos de meia-vida longa são o ^{137}Cs e o ^{90}Sr [UNSCEAR, 2000]. A partir da década de 80, os acidentes radiológicos e nucleares passaram a ser as principais fontes de liberação de radionuclídeos artificiais [Anjos, 2000; Anjos, 2001; Anjos, 2004].

Devido a estes fatos, a população mundial recebe, em média, uma dose efetiva devido à exposição externa por fontes naturais e artificiais da ordem de 2,8 mSv ao ano. Aproximadamente 85 % deste valor (2,4 mSv) é proveniente da radiação de fundo natural. O restante, cerca de 0,5 mSv, é consequência direta de fontes de radiação gama artificial [UNSCEAR, 2000].

Por outro lado, existem regiões no mundo onde os níveis de radiação natural são consideravelmente altos [UNSCEAR, 2000; Anjos, 2004]. Yangjing (China) e a região litorânea de Kerala (Índia) são exemplos onde a taxa de dose externa devido à radiação gama varia entre 1,5 e 20 mSv ao ano. Em vários municípios brasileiros, tais como Caetité (BA), Buena (RJ), Poços de Caldas (MG) e Guarapari (ES), a dose de radiação gama varia entre 3,5 e 10 mSv ao ano. Em todas estas regiões há elevadas concentrações de *monazita* e *zirconitas* nos solos e rochas. Estes minerais são ricos em ^{232}Th e ^{238}U .

No mundo, também existem áreas com altas concentrações de radionuclídeos produzidos pelo homem. Nestes lugares ocorreram acidentes radiológicos ou nucleares, testes ou uso de armas nucleares. Por exemplo, Belarus, Ucrânia, Rússia e lugares vizinhos foram contaminados em diferentes graus durante o acidente no reator de Chernobyl, em 1986. Bombas atômicas foram explodidas em Hiroshima e Nagasaki em 1945. Entre 1945 e 1958, o Atol de Bikini (Ilhas Marshall) foi um dos lugares usado pelos EUA para testes nucleares. No Brasil, em 1987, ocorreu um acidente radiológico com uma fonte de ^{137}Cs na cidade de Goiânia (GO). Nestes dois últimos lugares, por exemplo, podem ser encontrados locais com taxas de dose de radiação gama da ordem de 3 e 15 mSv ao ano, respectivamente [HP, 1997; Facure, 2001a].

Por estes motivos, é importante conhecer os efeitos ambientais da radioatividade. Dentro deste contexto, encaixa-se a área de pesquisa de

Radioecologia que, através do uso de isótopos radioativos como traçadores nucleares, permite o estudo do comportamento ou distribuições destes radionuclídeos no meio ambiente e, também, para a pesquisa biofísica básica.

Então, este trabalho se propõe a estudar a distribuição de ^{137}Cs no solo e no interior de árvores frutíferas tropicais. A escolha deste radionuclídeo se deve ao fato de ser um elemento radioativo tipicamente presente em locais contaminados artificialmente. A escolha de vegetais tropicais, por existirem poucas informações disponíveis na literatura para este tipo de plantas, além do fato de produzirem alimentos freqüentemente consumidos na dieta alimentar brasileira.

Esta dissertação de tese também se propõe a investigar se o ^{137}Cs pode ser utilizado como um rastreador do comportamento dinâmico do transporte de nutrientes no interior destas árvores frutíferas. Isto ocorre porque alguns trabalhos têm demonstrado que o ^{137}Cs e o ^{40}K se distribuem de forma semelhante no interior dos vegetais [Hass, 1995] e o potássio, além de ser um nutriente vegetal, pode ser facilmente substituído pelo ^{137}Cs durante o processo de absorção de nutrientes do meio externo.

Para estes fins, foram coletadas amostras de solo, raízes, caules, folhas e frutos de duas goiabeiras, um abacateiro e uma mangueira, cultivadas em um dos principais focos de contaminação do acidente radiológico de Goiânia, localizado na Rua 6, quadra Q, lote 18 do Setor Ferroviário na cidade de Goiânia.

Estas amostras foram analisadas no Laboratório de Radioecologia (LARA) do Instituto de Física da Universidade Federal Fluminense, utilizando-se a técnica de espectroscopia da radiação gama.

Foram observados valores significativos de concentração de ^{137}Cs em todas as amostras analisadas para diferentes partes destes vegetais tropicais: raízes, caules, folhas e frutos. A partir destes resultados foi possível construir mapas das distribuições radiais de ^{137}Cs pelo tronco principal e pela copa de árvores tropicais brasileiras. No caso especial das goiabeiras, foi possível determinar a distribuição de ^{137}Cs indo deste a raiz até os seus frutos. A análise do comportamento do ^{40}K permitiu a comparação com as

concentrações de ^{137}Cs nas três espécies estudadas. Especialmente para as duas goiabeiras, serão apresentados os valores da concentração de ^{40}K presentes em dois discos do tronco principal de duas goiabeiras.

Para que este estudo seja melhor compreendido, este trabalho foi dividido em 5 capítulos. Assim, no Capítulo 2 serão descritos os materiais e métodos utilizados nas medidas experimentais. No Capítulo 3, serão descritos os modelos típicos utilizados para a descrição do comportamento de ^{137}Cs no solo e no interior de vegetais. No Capítulo 4, serão apresentados os dados obtidos e uma breve discussão dos resultados e, finalmente, no Capítulo 5, as principais conclusões e sugestões para trabalhos futuros, obtidos a partir deste trabalho.

Capítulo 2

Materiais e Métodos

Para compreender o comportamento dos mecanismos de absorção, transporte e distribuição de radionuclídeos nos vegetais tropicais superiores é necessário determinar as suas concentrações em diferentes regiões do vegetal, como caules, frutos, folhas e raízes. Para este fim, diversas amostras vegetais devem ser coletadas, preparadas seguindo certas normas e posteriormente analisadas em um laboratório.

Assim, neste capítulo serão descritos os procedimentos de coleta, os cuidados na preparação e análise das amostras.

2.1 A Coleta das Amostras

Locais em que ocorreram acidentes radiológicos ou nucleares tornam-se excelentes “laboratórios” para a compreensão das conseqüências da interação de radionuclídeos com o meio ambiente, uma vez que, dependendo da meia vida do elemento radioativo, é possível observar sua presença por muitos anos. Por isso, para a realização deste trabalho foi escolhido um dos principais locais onde ocorreu, em 1987, o acidente radiológico na cidade de Goiânia: o antigo ferro-velho II [IAEA,1988; HP, 1991], localizado na Rua 6, quadra Q, lote 18, do Setor Ferroviário. Este foi o único dos principais locais envolvidos no acidente que não havia recebido uma camada de concreto durante os trabalhos de descontaminação realizados pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). Além disso, este terreno foi liberado para ser um novo local de trabalho (depósito de materiais recicláveis) e de moradia para cinco pessoas. Neste lote também era possível encontrar vários tipos de árvores frutíferas.

As amostras foram coletadas no início de 2001. Em agosto deste mesmo ano, foi colocada uma camada de concreto neste terreno pela CNEN, como resultado de um trabalho de pesquisa realizado previamente pelo nosso grupo de pesquisa [Facure, 2001a; Facure, 2001b; Facure, 2001c; Anjos, 2002]. A Figura 2.1 apresenta uma ilustração deste lote na época em que foram coletadas amostras de solo e de vegetais. Na parte frontal do terreno funciona um depósito de materiais recicláveis. No centro há, além de uma casa de alvenaria (casa 3), três casas de madeira. Próximo a estas casas eram cultivadas algumas árvores frutíferas: *três abacateiros, uma mangueira e três goiabeiras*. No fundo do lote existia uma área de cultivo de hortaliças ao mesmo tempo em que servia de depósito de lixo.

Assim, para a realização deste trabalho foram coletadas amostras de folhas, frutos, galhos, caules, raízes de um dos abacateiros (**A1**), da mangueira (**M**) e de duas das goiabeiras (**G1**) e (**G2**). Somado a estas amostras, também foram coletadas amostras de perfil de solo ao lado de cada uma destas árvores.

As amostras de solo foram coletadas a cada 5 cm de profundidade, através do uso de um trado. A profundidade total dos perfis de solo variou entre 30 e 60 cm. O subsolo deste local era composto por restos de materiais de construção, que em algumas vezes impediram a coleta de amostras de solo com maior profundidade. A coleta de amostras de solo foi monitorada por um medidor de radiação do tipo Geiger Müller.

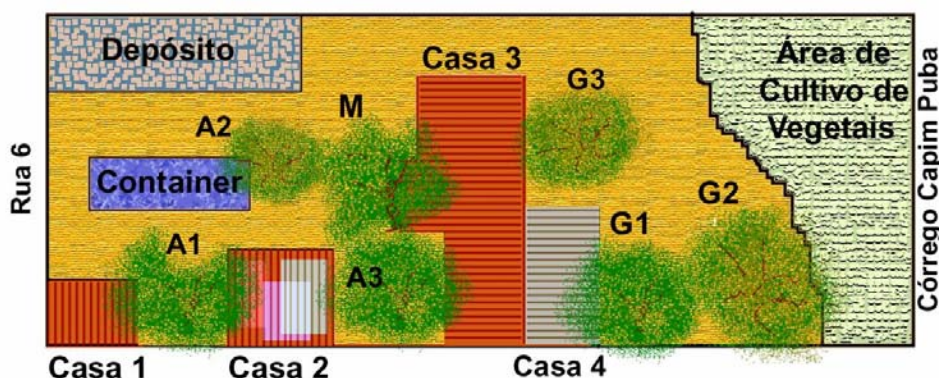


Figura 2.1: Ilustração do lote onde foram coletadas as amostras analisadas neste trabalho, indicando as posições onde eram cultivados abacateiros (A1, A2 e A3), mangueira (M) e goiabeiras (G1, G2 e G3).

As amostras vegetais foram coletadas utilizando-se tesouras e serrotes apropriados para poda de árvores. Para a coleta de amostras de cada árvore frutífera foram escolhidos galhos de grande porte, de tal modo que fosse possível retirar amostras de caules, galhos, folhas e frutos, mas que não trouxessem danos ao crescimento destas plantas.

No caso das goiabeiras foram coletadas, também, amostras do tronco principal. Isto foi possível porque durante um trabalho prévio realizado entre 1999 e 2000 pelo nosso grupo, foi observado que as goiabeiras (G1) e (G2) produziam frutos com contaminação de ^{137}Cs acima dos valores máximos permitidos para o consumo [Facure, 2001c; Facure, 2001b]. Assim, estas árvores foram removidas pela CNEN em março de 2001 e isto possibilitou a análise de vários discos dos troncos principais destas duas goiabeiras.

As Figuras 2.2 a 2.5 apresentam ilustrações de cada uma destas árvores e a localização das posições em que foram coletadas as amostras estudadas.

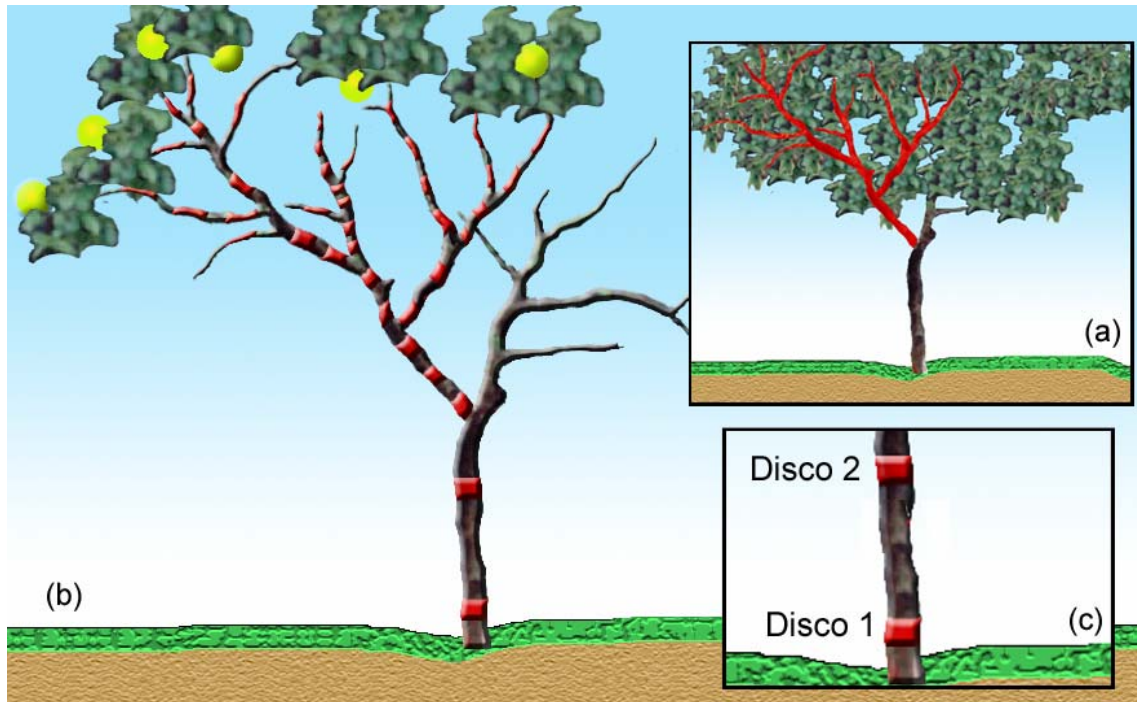


Figura 2.2. Ilustração da goiabeira (G1). a) Vista total da árvore com a identificação do galho que foi analisado neste trabalho; b) Identificação das posições onde foram colhidos as amostras de caules, galhos, folhas e frutos; c) Identificação das posições das amostras coletadas no tronco principal.

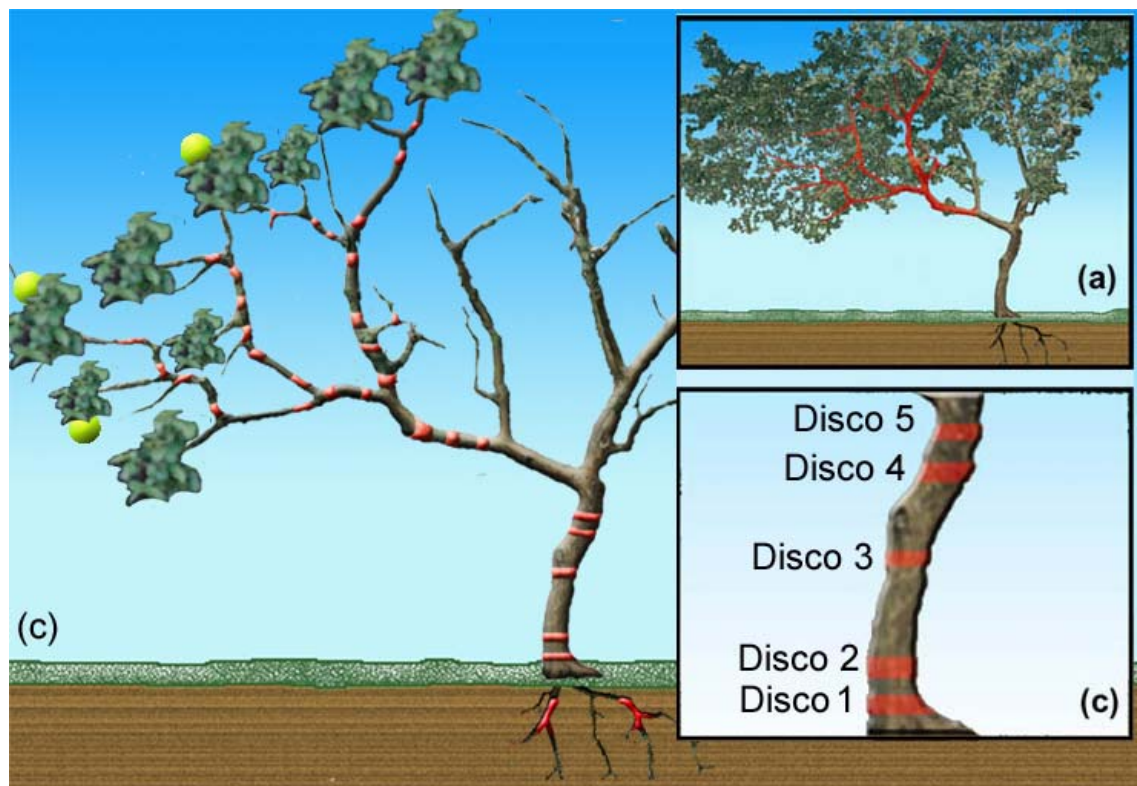


Figura 2.3. Ilustração da goiabeira (G2). a) Vista total da árvore com a identificação do galho que foi analisado neste trabalho; b) Identificação das posições onde foram colhidos as amostras de caules, galhos, folhas e frutos; c) Identificação das posições das amostras coletadas no tronco principal.

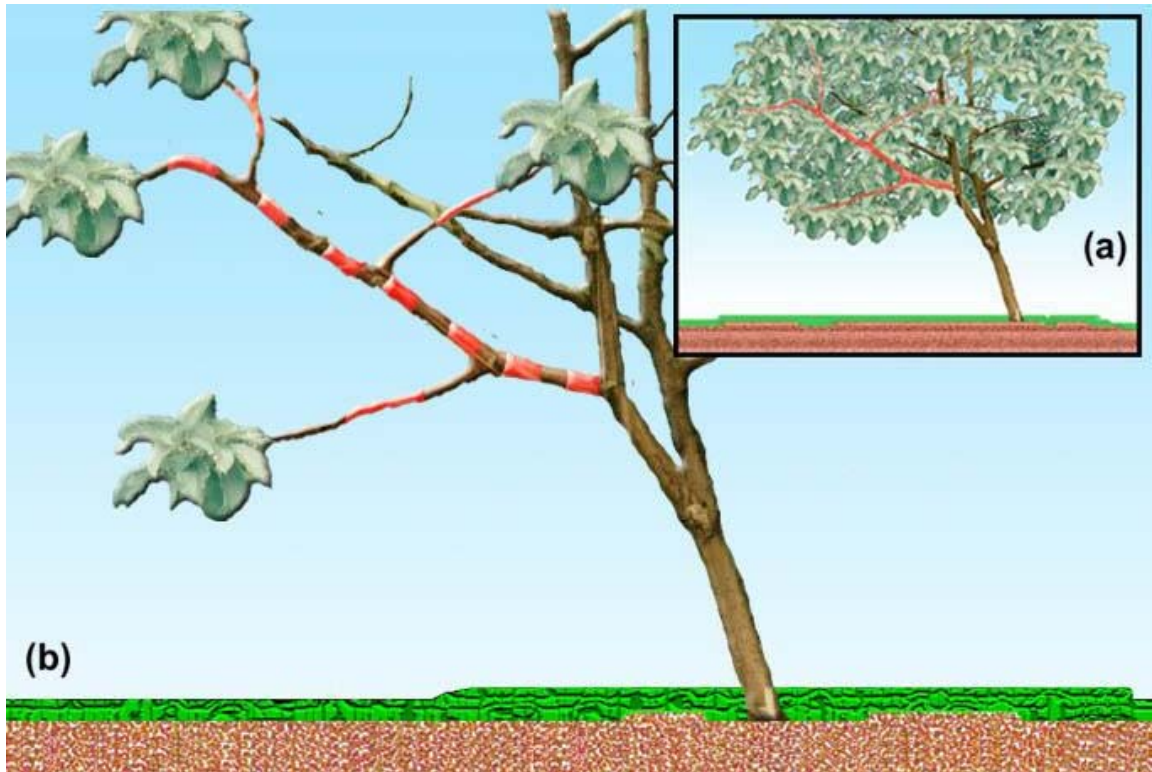


Figura 2.4. Ilustração do abacateiro (A1). a) Vista total da árvore com a identificação do galho que foi analisado neste trabalho; b) Identificação das posições onde foram colhidas as amostras de caules, galhos, folhas.

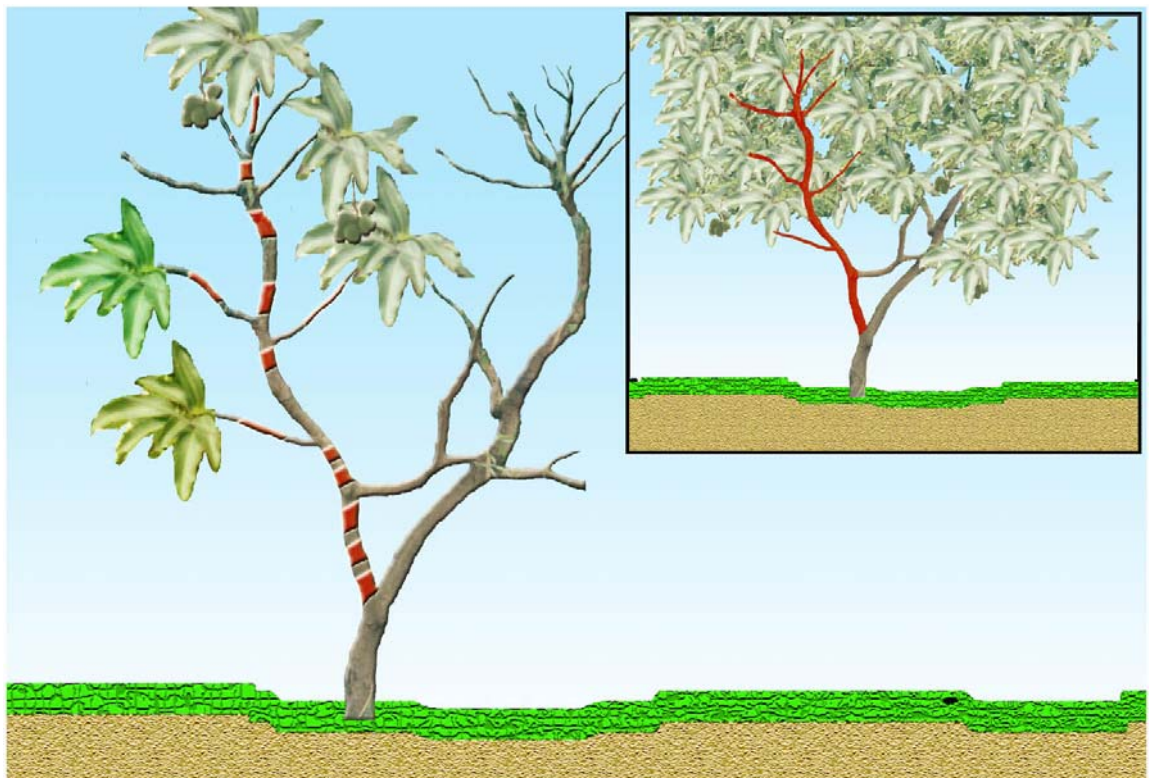


Figura 2.5. Ilustração da mangueira (M). a) Vista total da árvore com a identificação do galho que foi analisado neste trabalho; b) Identificação das posições onde foram colhidas as amostras de caules, galhos, folhas.

A goiabeira (G1) possuía cerca de 4 metros de altura. Os discos 1 e 2 foram coletados a 20 cm e 100 cm do solo, respectivamente. O início do galho analisado encontrava-se a 1,5 m do solo. Somando os 2 discos do caule principal, foram coletadas 36 amostras de caule, 9 amostras de folhas e frutos e 1 amostra de raiz.

A goiabeira (G2) possuía cerca de 5 metros de altura. Os discos 1, 2, 3, 4 e 5 foram coletados a 10 cm, 30 cm, 50 cm, 75 cm e 100 cm do solo, respectivamente. O início do galho analisado encontrava-se a 1,2 m do solo e 25 amostras de caule puderam ser coletadas. Somadas a estas, foram coletadas 5 amostras de folhas, 3 de frutos e 2 de raízes.

O acabateiro (A1) possuía cerca de 6 metros de altura e o início do galho analisado estava à cerca de 3 metros de sua base. Foram coletadas 11 amostras de caule e 4 de folha.

E, finalmente, a mangueira (M). Este espécime possuía cerca de 6 metros de altura e o início do galho analisado encontrava-se a cerca de 2.5 metros de sua base. Foram coletadas 11 amostras de caule, 5 de folhas e 2 de frutos.

2.2 A Preparação das Amostras

Todas as amostras coletadas devem passar por um tratamento prévio, seguindo certas normas de preparação independente de qual seja a sua origem (solo, vegetal, rocha etc). Tais normas servem para que sejam corretamente analisadas e resultem em dados confiáveis. Desta forma, será possível também comparar os dados obtidos neste trabalho com os que forem obtidos em outros laboratórios [IAEA,1989].

As amostras de solo foram preparadas da seguinte forma: primeiro, as amostras foram peneiradas para que ficassem homogêneas. Este procedimento permite retirar materiais indesejados, tais como pequenas pedras, folhas, raízes e outros resíduos. Numa segunda etapa, as amostras

passaram por um processo de secagem, utilizando-se uma estufa a uma temperatura de aproximadamente 110°C. Esta é uma etapa importante, porque qualquer porcentagem de água presente na amostra pode, no resultado final, inferir em valores de concentração de ^{137}Cs menores do que realmente são. As amostras foram acondicionadas em pequenos frascos cilíndricos selados, de forma que todo o seu volume fosse ocupado. A escolha da forma e tamanho dos frascos tem uma razão muito importante e será discutida mais tarde no Item 2.4.2, onde será descrito o cálculo das concentrações de ^{137}Cs .

As amostras vegetais foram divididas em três categorias: folhas e frutos, troncos e raízes e, a terceira, discos. As três categorias de amostras vegetais tiveram que ser lavadas em água corrente e sabão para retirar possíveis resíduos provenientes de fatores externos, tais como poeira trazida pelo vento ou mesmo terra dos canteiros.

Após a etapa de lavagem, as amostras passaram por um processo de secagem, tal como foi feito para as amostras de solo, até atingirem uma massa constante. Embora as atividades de ^{137}Cs das amostras vegetais também possam ser normalizadas por sua massa *in natura*, o processo de secagem resulta em alguns outros benefícios. A secagem de frutos, folhas, caules e raízes também permite que estes materiais possam ser armazenados por um longo período de tempo, além de aumentar a quantidade de amostra que poderá ser colocada por frasco, aumentando a eficiência do processo de detecção.

Após as amostras de vegetais estarem limpas e devidamente secas, o processo final de preparação de cada uma delas foi realizado de forma diferenciada. Isto foi efetuado com o intuito de investigar com maior clareza os mecanismos biológicos existentes nas árvores em questão.

As amostras de folhas e frutos foram as mais simples de serem preparadas. Com a ajuda de um moinho ou de um pilão, estas amostras foram transformadas em pó. Posteriormente, foram acondicionadas em frascos cilíndricos (idênticos aos que foram utilizados para as amostras de solo) e selados.

As amostras de troncos são, na verdade, pedaços da parte aérea da árvore. Durante esta parte do processo de preparação, foram retiradas amostras das cascas e do interior do caule com a ajuda de uma grosa de carpinteiro.

Como um dos objetivos deste trabalho era de estudar a distribuição radial do ^{137}Cs nos troncos de árvores frutíferas tropicais, antes da preparação das amostras dos troncos foi realizada uma identificação dos anéis de crescimento.

Embora não tenha sido possível coletar amostras do tronco principal da mangueira e do abacateiro, nestes casos foram realizadas identificações dos anéis dos troncos secundários (galhos coletados). Para as duas árvores foi possível identificar quatro anéis de crescimento para aqueles que possuíam maior diâmetro.

Assim, estas amostras de tronco da mangueira e do abacateiro foram subdivididas em aproximadamente quatro camadas (uma da casca e três internas). Estas foram trituradas, e posteriormente acondicionas e seladas nos frascos cilíndricos. Já para os troncos (ou galhos) mais finos foram preparadas amostras apenas das cascas e do caule como um todo.

Como para as goiabeiras (G1) e (G2) foi possível coletar amostras do tronco principal, apenas algumas amostras dos troncos secundários tiveram seus anéis identificados e preparados separadamente. Para o restante, as amostras foram preparadas triturando-se a parte interna do tronco sem diferenciar os anéis de crescimento. Desta forma, boa parte das amostras dos troncos secundários das goiabeiras (G1) e (G2) foram subdivididas em duas partes (uma de casca e outra interna). Assim, somando o número de amostras de cada espécime, este trabalho pôde contar cerca de 600 amostras de frutos, folhas, caules e raízes.

Por fim, foi realizado o preparo das amostras do tronco principal (que aqui serão denominados de discos, com o objetivo de diferenciá-los dos troncos secundários). Como os discos possuíam diâmetros bem maiores que os troncos secundários, foi possível realizar um trabalho mais minucioso. Isto permitiu a identificação de regiões preferenciais de acúmulo de ^{137}Cs . Assim,

estas amostras foram trabalhadas da seguinte forma: com a ajuda de um formão foram retiradas finas camadas de tecido de cada disco, respeitando os anéis indicadores da idade do vegetal. Estas finas camadas foram transformadas em pó e, em seguida, lacradas nos frascos cilíndricos.

Os anéis de crescimento das goiabeiras foram mais difíceis de serem identificados. Esta dificuldade de identificação pode ser compreendida devido à presença de alguns fatores. Além das estações do ano em climas tropicais não serem bem definidas, os tecidos presentes nos troncos das goiabeiras são misturados e não apresentam áreas com concentrações específicas de apenas um tipo de tecido. A Figura 2.6a mostra uma foto do disco 5 da goiabeira (G2). Na Figura 2.6b podem ser vistos os anéis identificados. A Figura 2.6c apresenta os cortes que foram realizados no disco para obtenção das amostras, de tal forma que para cada anel foi possível obter várias amostras. Este procedimento permitiu a divisão de um disco em até 90 novas amostras. Somando os 5 discos da goiabeira (G2) e os 2 da goiabeira (G1), esta análise da distribuição radial pôde contar com, aproximadamente, 490 amostras.

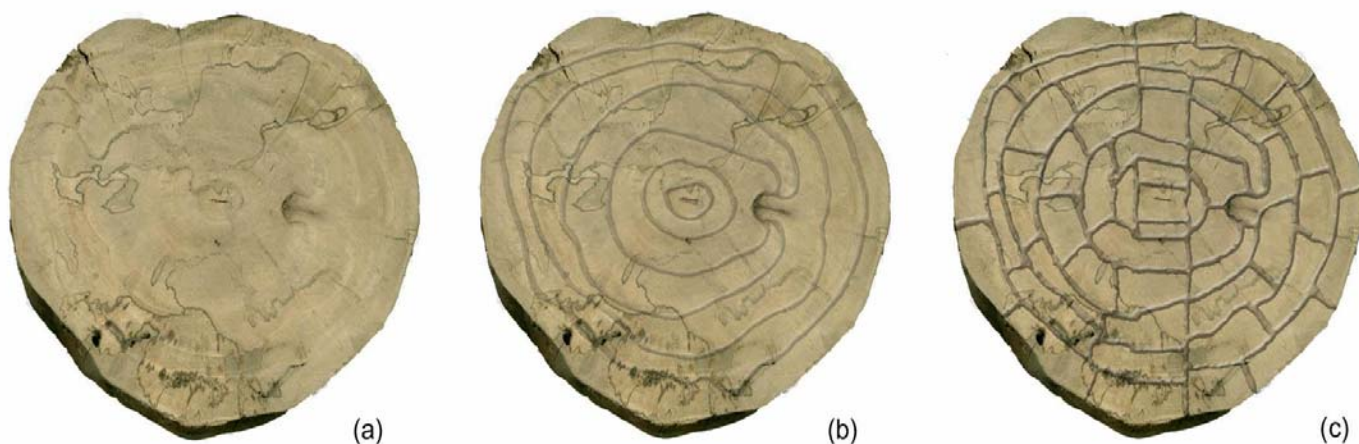


Figura 2.6: a) Fotografia do disco 5 da goiabeira (G2); b) Visualização dos anéis que foram identificados para esta amostra e; c) Cortes realizados no disco para o preparo de várias amostras para um dado anel de crescimento.

Depois deste procedimento de preparação, cada amostra de solo possuía uma massa de, aproximadamente, 12 gramas, enquanto que as amostras vegetais não ultrapassavam 4 gramas. Apesar da pequena quantidade de massa destas amostras, será possível realizar as medidas de

^{137}Cs devido a sua alta concentração. Entretanto, para realizar medidas do ^{40}K , que apresenta baixa concentração, os valores de massas foram alterados para cerca de 10 a 15 gramas. Estes valores maiores de massa eram alcançados apenas unido 4 amostras semelhantes.

2.3 Arranjo Experimental

A Figura 2.7 apresenta uma ilustração do equipamento utilizado no LARA que se baseia na técnica de espectroscopia da radiação gama. Em linhas gerais, este arranjo é constituído de um detector envolvido em uma blindagem, um dispositivo eletrônico e um sistema de aquisição de dados. O detector era composto de um cintilador de iodeto de sódio ativado com tálio, acoplado a uma fotomultiplicadora. O modelo escolhido (905-4W da EGG&ORTEC) apresentava uma característica especial, a qual permitia colocar a amostra no interior de uma abertura (janela) do detector. Este procedimento permitiu um aumento na eficiência de detecção das amostras. O dispositivo eletrônico era constituído de uma base com pré-amplificação, um amplificador e uma fonte de alta tensão. Os sinais eletrônicos foram digitalizados em um microcomputador, utilizando-se uma placa de aquisição de dados de 2048 canais.

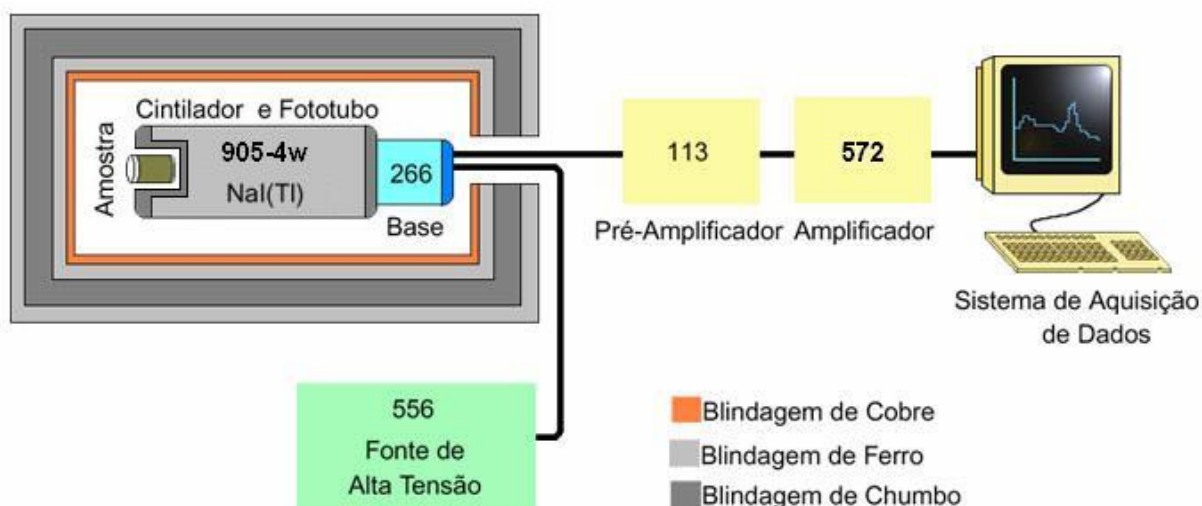


Figura 2.7: Ilustração do arranjo experimental utilizado no LARA. O detector, os módulos eletrônicos e a placa de aquisição de dados foram adquiridos da EGG & ORTEC. Os códigos apresentados em cada componente representam o modelo utilizado. A blindagem foi confeccionada no LARA.

2.3.1 A Blindagem

Para que o número de contagens devido à radiação de fundo pudesse ser minimizado, o detector e as amostras a serem medidas foram isolados do meio externo. Este isolamento ou blindagem deve ser construído de maneira que reduza os efeitos externos e evidencie o conteúdo da amostra. A blindagem utilizada neste experimento foi confeccionada no LARA. Ela possui uma simetria cilíndrica (com aproximadamente 60cm de comprimento), sendo constituída de três camadas de metais: a mais externa possui 5 cm de espessura de ferro. A intermediária possui 15 cm, sendo 10 cm de chumbo e 5 cm de ferro. A mais interna é composta de 0,3 cm de cobre. O uso interno da camada de cobre e ferro se faz necessário para minimizar os efeitos da radiação de retro-espalhamento (“backscattering”), que surgem nas medidas.

Esta blindagem permite reduzir a radiação de fundo de cerca de 180 eventos por segundo para cerca de 6 eventos por segundo, quando o detector é colocado dentro da blindagem.

2.3.2. O Detector NaI(Tl)

Existem vários tipos de detectores para medir a energia da radiação γ que poderiam ter sido usados neste tipo de arranjo experimental. A escolha do tipo do detector utilizado baseia-se nas características de cada um deles.

O detector de iodeto de sódio ativado com tálio tem sido utilizado com frequência para a determinação de contaminações por emissores de fótons, com energias maiores que 100 keV. Dentre as principais vantagens deste tipo de detector, pode-se ressaltar a sua alta eficiência e a facilidade de operação. Entretanto, os cristais cintiladores não costumam ter uma boa resolução em energia. Isto é uma desvantagem tendo em vista que emissões γ com energias muito próximas podem resultar espectros com sobreposição de picos. Neste caso, um detector semicondutor de Germânio (Ge-Li) dopado com Gálio ou hiper-puro seria mais indicado.

Um detector como este tem um alargamento em energia 98% menor que um de NaI(Tl). Isto é, a resolução em energia é muito melhor. Porém, a desvantagem do detector de germânio é o preço ser muito elevado e a sua manutenção requerer cuidados especiais.

Neste trabalho, serão determinadas as concentrações de ^{137}Cs e ^{40}K . Ambos elementos decaem por emissão de radiação γ e possuem apenas um único valor de energia tanto para o ^{137}Cs (662 keV) quanto para o ^{40}K (1460 KeV). Desta forma, o uso de um detector de NaI(Tl) não prejudicaria a interpretação dos espectros.

2.3.2.1 Funcionamento

O detector NaI(Tl) utilizado neste trabalho tem como característica básica o emprego de cristais cintiladores. Estes cristais têm a função de frear completamente uma porção significativa dos raios γ incidentes, o que permite calcular, além da quantidade de raios γ , o espectro de energias do material analisado e suas intensidades relativas.

A Figura 2.8 apresenta uma ilustração de um detector NaI(Tl). Nesta ilustração podem ser observados os mecanismos básicos de seu funcionamento: transformação de um raio γ incidente em um pulso elétrico. Também podem ser observados os principais tipos de interações que ocorrem no interior deste tipo de detector.

Quando a radiação γ interage com o cristal cintilador o resultado é a ionização e excitação das moléculas que constituem o cristal. Esta excitação produz um fóton de luz, que será transmitida ao fotocátodo da válvula fotomultiplicadora causando a emissão de fotoelétrons. No interior da fotomultiplicadora estes elétrons são acelerados por um campo elétrico e focalizados nos dinodos desta válvula, que emitirá de dois a três novos elétrons. Assim, para uma fotomultiplicadora típica de dez estágios, o ganho de corrente é da ordem de 10^6 .

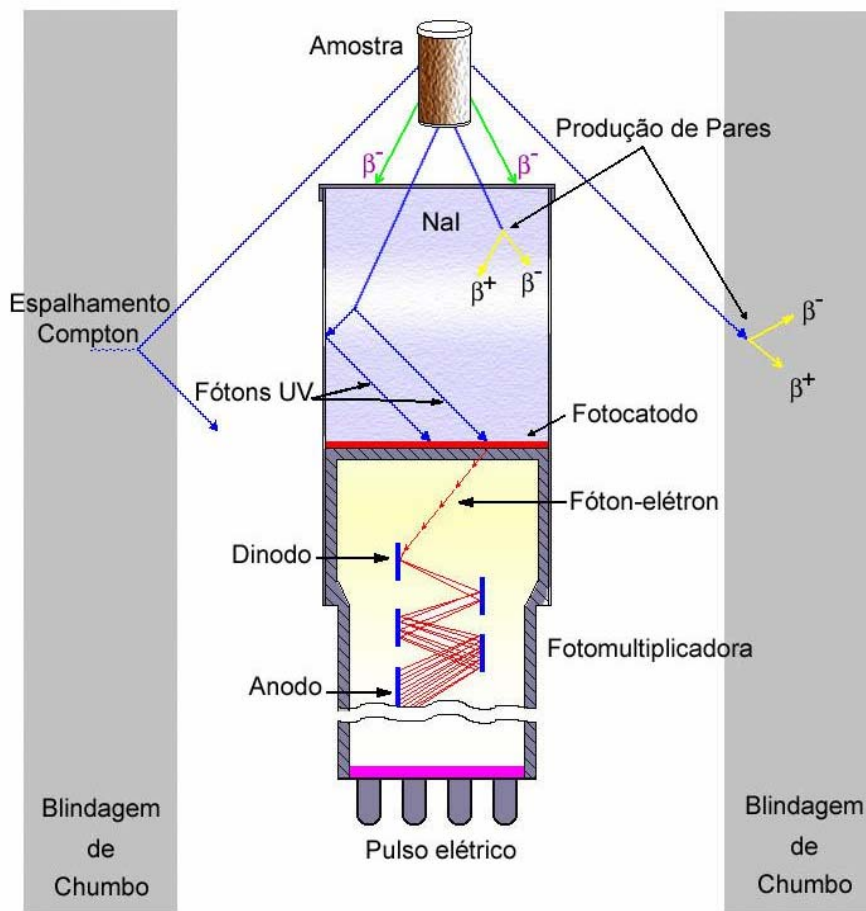


Figura 2.8: Ilustração do funcionamento de um detector de NaI(Tl) e dos principais tipos de interações que ocorrem em seu interior: efeito fotoelétrico, espalhamento Compton e produção de pares [Ortec, 1984].

Este pulso elétrico resultante é negativo e, em geral, tem uma amplitude de poucos milivolts e será proporcional à energia do raio γ emitido pelo radionuclídeo.

Para entender como o cristal cintilador produz os fótons que gerariam esta corrente, devem ser estudados os processos de transmissão da energia da radiação γ às moléculas do material cintilador. Como os fótons não possuem carga elétrica, são capazes de atravessar porções consideráveis de matéria sem sofrer interações. Isto é particularmente válido para fótons de alta energia. A absorção e a detecção de raios γ envolvem as interações iniciais do fóton com a matéria, através de um dos principais processos: a *produção de pares*, o *espalhamento Compton* e a *absorção fotoelétrica*.

A criação de pares e^+e^- ocorre quando a energia do fóton (superior a 1022 keV) é transformada em um pósitron mais um elétron (com massa total equivalente a 1022 keV, isto é, duas vezes a massa do elétron) e o excesso de energia (além de 1022 keV) em energia cinética do par. Em seguida, o pósitron sofre aniquilação com algum elétron disponível no material, produzindo um par de raios γ de 511 keV.

O espalhamento Compton é o processo de interação mais provável de acontecer em energias da ordem de keV. Ele consiste em uma interação entre um gama de energia $h\nu$ e um elétron livre (ou pouco ligado ao núcleo) cuja parte da energia do fóton é transferida para um elétron e o restante é "espalhado" na forma de um outro fóton. A energia do fóton remanescente ($h\nu'$) depende do ângulo de espalhamento (θ), como se pode observar na Figura 2.9.

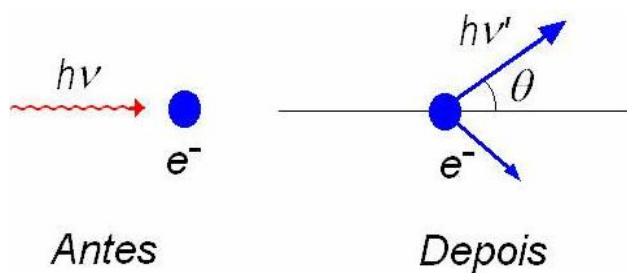


Figura 2.9: Ilustração do processo de espalhamento Compton [Knoll, 1979].

A energia $h\nu'$ do raio γ espalhado em termos do ângulo θ é escrita da seguinte forma:

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu}{m_0c^2}(1 - \cos\theta)} \quad (2.1)$$

onde m_0c^2 é a massa de repouso do elétron. A energia de recuo do elétron é dada por:

$$E_{e^-} = h\nu - h\nu' = h\nu \left[\frac{\frac{h\nu}{m_0c^2}(1 - \cos\theta)}{1 + \frac{h\nu}{m_0c^2}(1 - \cos\theta)} \right] \quad (2.2)$$

Desta forma, pode-se notar dois casos extremos: o primeiro será quando o espalhamento for rasante, ou seja, o valor de θ for aproximadamente zero ($\theta \cong 0$). Neste caso, de acordo com as equações anteriores, teremos $h\nu \cong h\nu'$ e $E_{e^-} \cong 0$. Isto significa que o elétron recuado possui muito pouca energia e o raio γ espalhado possui quase a mesma energia do raio incidente. O segundo caso extremo será quando o raio espalhado possuir um ângulo de 180° ($\theta \cong \pi$). Neste caso, o raio γ é retro-espalhado na sua direção de origem e o elétron recua na direção de incidência. Este extremo é a forma de transferência máxima de energia para um elétron com apenas uma interação do tipo Compton.

Em circunstâncias normais, os ângulos de espalhamento que serão detectados variarão continuamente entre estes dois extremos. Como consequência deste fato, um contínuo de energias poderá ser transferido para o elétron sendo que o seu valor máximo será quando $\theta \cong \pi$.

O último dos três principais processos de interação com a matéria é a absorção fotoelétrica. Neste caso, praticamente toda a energia do fóton ($h\nu$) é transferida para um elétron do material. A Figura 2.9 ilustra este processo onde a energia é transferida a um elétron ligado ao núcleo com energia E_b . Apesar deste tipo de mecanismo só ser predominante para baixas energias (da ordem de keV), a absorção fotoelétrica é o processo mais indicado para medir a energia original do raio γ incidente.

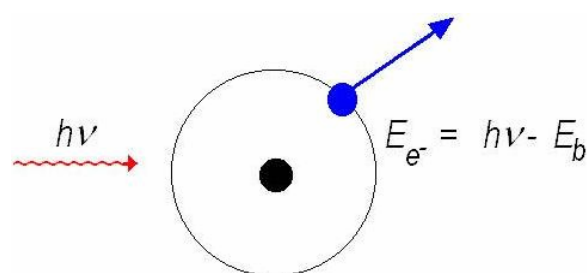


Figura 2.10: Ilustração do processo de Absorção Fotoelétrica em um elétron ligado a um átomo [Knoll, 1979].

Desta forma, o pulso elétrico de saída no detector é processado por uma placa de aquisição de dados e o que se observa é um espectro semelhante ao ilustrado na Figura 2.11. Este espectro é um espectro real resultante de uma amostra padrão contendo ^{137}Cs e ^{40}K .

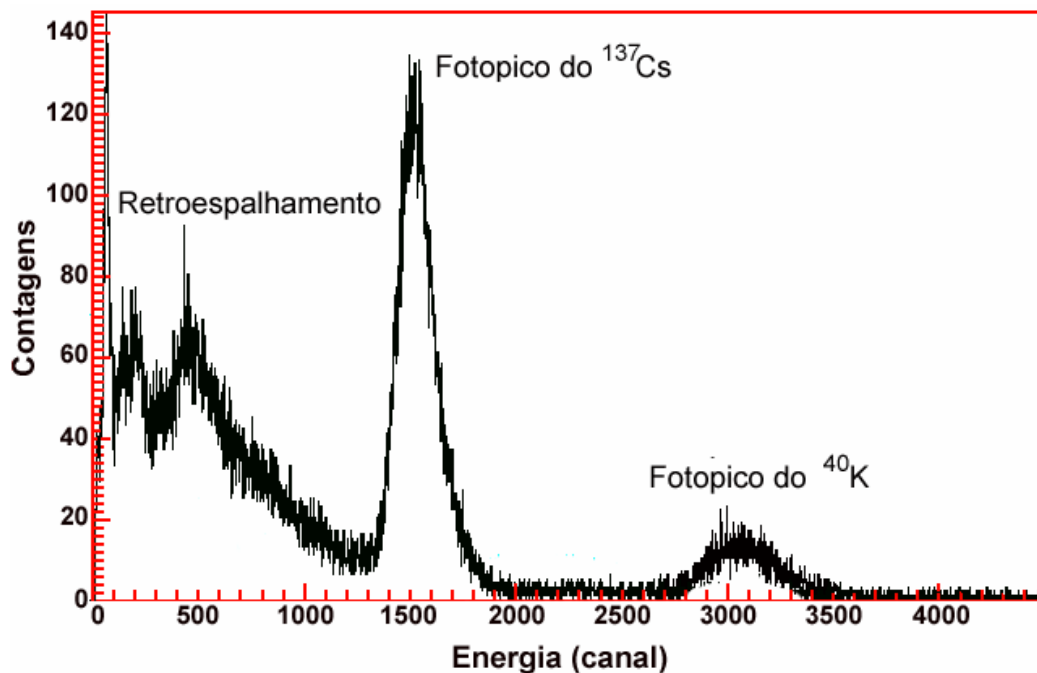


Figura 2.11: Espectro de energia de uma amostra padrão (contendo ^{137}Cs e ^{40}K) obtido durante 1 hora no arranjo experimental utilizado neste trabalho (detector de NaI(Tl)).

2.3.3 Propriedades do Detector e a Calibração em Energia .

Nos tópicos a seguir serão discutidas as principais propriedades e limitações de um detector NaI(Tl) utilizado neste trabalho.

2.3.3.1 Resolução em Energia

Uma propriedade importante dos detectores utilizados em espectroscopia da radiação gama é a resolução em energia. Ela pode ser examinada qualitativamente apenas observando-se um espectro de energia multicanal proveniente de uma fonte monoenergética. A Figura 2.12 ilustra dois espectros superpostos de uma única fonte monoenergética para dois detectores com diferentes resoluções em energia. Nota-se que quanto menor for a largura do pico, melhor será a resolução em energia.

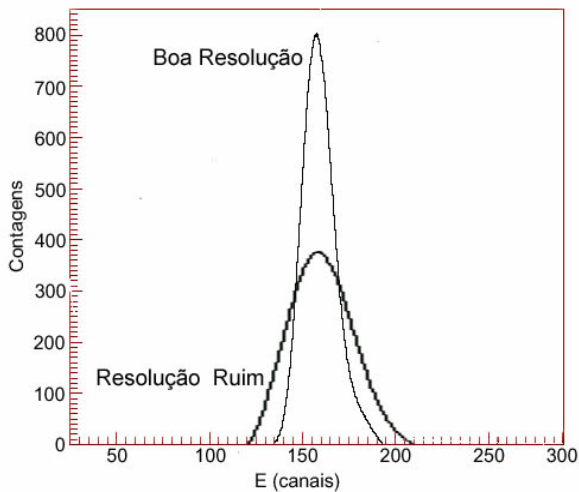


Figura 2.12: Exemplos de espectros de energia para detectores com resoluções em energia boa e ruim [Knoll, 1979].

De uma maneira mais formal, a resolução em energia é definida como a razão entre a largura do pico na metade de sua altura e a sua posição em energia, como pode ser visto na ilustração da Figura 2.13. A largura a meia altura (full width at half maximum, FWHM) é uma grandeza com dimensão de energia, desta forma, a resolução em energia é uma grandeza adimensional, normalmente expressa em porcentagens.

Neste trabalho, a largura a meia altura média obtida para os picos de ^{137}Cs ($E = 662 \text{ keV}$) foi de $\Delta E \approx 50 \text{ keV}$. Desta forma, a resolução em energia do espectrômetro do LARA foi de:

$$R = \frac{\Delta E}{E} \cdot 100 \cong 7,6\% \quad (2.4)$$

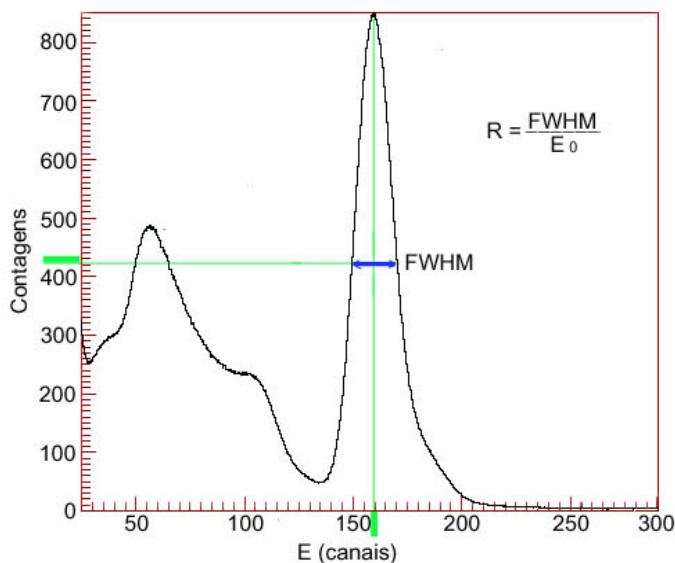


Figura 2.13: Definição da resolução em energia de um detector em função da largura a meia altura.

2.3.3.2 Eficiência de Detecção

A princípio, um pulso elétrico de saída é gerado a cada quantum de radiação que interage no cristal de um detector. Devido ao fato de que raios γ podem viajar grandes distâncias entre uma interação e outra, detectores para este tipo de radiações possuem em geral menos do que 100% de eficiência. Então, seria muito útil uma grandeza que estimasse a razão entre o número de pulsos registrados e o número de fótons incidentes no detector: a eficiência de detecção.

É conveniente subdividir-se as eficiências de contagens em duas classes: *Absoluta* e *Intrínseca*. Eficiências absolutas são definidas como:

$$\varepsilon_{abs} = \frac{N^{\circ} \text{ de pulsos registrados}}{N^{\circ} \text{ de quanta de radiação emitidos pela fonte}} \quad (2.5)$$

e são dependentes não só das propriedades do detector, mas também de detalhes da geometria de contagem (distância entre o detector e a fonte, por exemplo). Assim, a eficiência intrínseca é definida como:

$$\varepsilon_{int} = \frac{N^{\circ} \text{ de pulsos registrados}}{N^{\circ} \text{ de quanta de radiação incidentes no detector}} \quad (2.6)$$

e não inclui o ângulo sólido subtendido pelo detector como um fator implícito. Os dois tipos de eficiências são relacionados, para fontes isotrópicas, por:

$$\varepsilon_{int} = \varepsilon_{abs} \frac{4\pi}{\Omega} \quad (2.7)$$

onde Ω é o ângulo sólido do detector visto pela fonte. É muito mais conveniente utilizar valores de eficiências intrínsecas ao invés de absolutas, pois a dependência da geometria é muito mais suave para a primeira. A eficiência intrínseca de um detector geralmente depende da energia da radiação incidente e da espessura física e do material que é composto o detector.

Eficiências de contagens são também categorizadas pela natureza do evento registrado. Se forem aceitos todos os pulsos provenientes do detector, então é apropriado usar-se eficiências totais. Neste caso, todas as

interações, não importando os valores das energias, são assumidas como sendo contadas. Em termos de uma distribuição de alturas de pulsos hipotéticas, toda a área abaixo do espectro é uma medida do número de pulsos contados, e devem ser contados na definição de eficiência total. A eficiência de pico, entretanto, assume que somente aquelas interações que depositam toda a energia da radiação incidente são contadas. Numa distribuição de alturas de pulsos, os eventos onde ocorrem a deposição de toda a energia da radiação incidente são normalmente evidenciados por um pico que aparece no final do espectro. Eventos que depositam somente parte da energia da radiação incidente irão aparecer mais à esquerda no espectro. O número de eventos de deposição da energia total pode ser obtido simplesmente integrando-se a área total abaixo do pico. A eficiência total e de pico é relacionada através da razão r , que algumas vezes é tabelada separadamente.

$$r = \frac{\mathcal{E}_{pico}}{\mathcal{E}_{total}} \quad (2.8)$$

Um detector com eficiência conhecida pode ser utilizado para medir a atividade de uma fonte radioativa [Knoll, 1979].

2.4. A Aquisição e Análise dos Dados

Foi estipulado que todas as amostras seriam medidas em intervalos de tempo de 3600 segundos, uma vez que os espectros obtidos apresentavam uma boa estatística para o fotopico de ^{137}Cs . Isto se deve ao fato das amostras analisadas possuírem um elevado grau de contaminação deste material radioativo, significativamente superior ao limite de detecção do nosso sistema de medida. Pela mesma razão, foi estipulado que as medidas de ^{40}K deveriam ser medidas em 14400 segundos, já que este material não apresentava concentrações tão altas quanto o ^{137}Cs .

Para a aquisição dos espectros, utilizou-se o código computacional DAMMCB [Ribas,1998]. Este programa, que pertence originalmente ao pacote

VAXPAK [Ribas, 1994], foi adaptado para o uso conjunto com uma placa TRUMP-2K da EGG&ORTEC. O programa DAMMCB permite a leitura dos dados e visualização em tempo real dos espectros de energia. Após o término da aquisição, este programa, além de fornecer a posição do centróide do fotopico e FWHM, permite obter o valor integral de sua área.

2.4.1 Calibração em Energia e Identificação dos Radionuclídeos.

Para que um certo radionuclídeo possa ser identificado em uma amostra, deve-se fazer uma calibração em energias. Esta calibração deverá ser uma função entre a energia dada em canais e a energia dada em elétrons-volts.

A energia de fontes emissoras de raios γ pode ser diretamente relacionada com a posição do centróide do pico correspondente no espectro de energia. Uma boa aproximação para esta relação pode ser obtida através de uma reta de calibração, que tem a seguinte forma:

$$E(\text{keV}) = a.E(\text{canal}) + b \quad (2.14)$$

Para a calibração em energia dos espectros presentes neste trabalho, foram utilizadas fontes de ^{22}Na ($E_{\gamma} = 511.0$ e 1274.5 keV), ^{60}Co ($E_{\gamma} = 1173.2$ e 1332.5 keV), ^{133}Ba ($E_{\gamma} = 81.0$, 302.9 e 356.0 keV), ^{137}Cs ($E_{\gamma} = 661.6$ keV) e ^{241}Am ($E_{\gamma} = 59,5$ keV). A Figura 2.14 apresenta uma ilustração da reta de calibração utilizada neste trabalho.

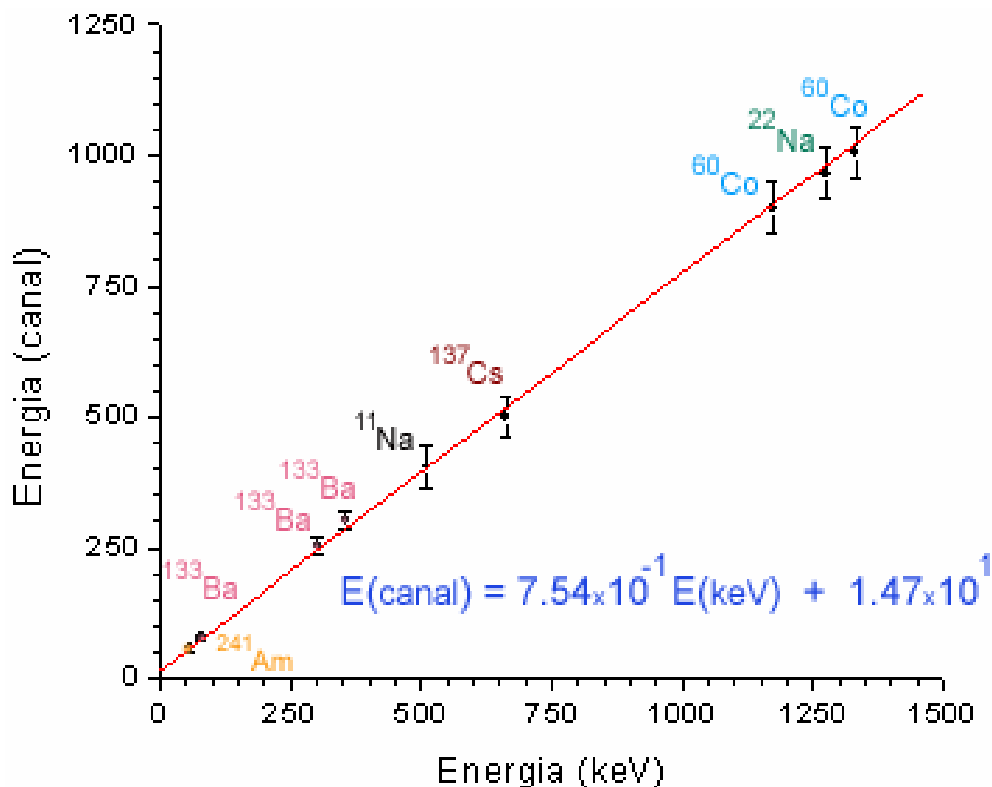


Figura 2.14: Reta de calibração em energia utilizada neste trabalho.

2.4.2 Determinação da Atividade e Estimativa de Incertezas.

Para que fossem determinadas as atividades de ^{137}Cs presentes nas amostras, foi utilizado o método relativo [ORTEC, 1984].

Este método baseia-se na simples comparação entre uma amostra que contenha uma atividade conhecida de um dado elemento radioativo e uma amostra que contenha uma atividade desconhecida deste mesmo radionuclídeo. Porém, para que esta atividade desconhecida seja estimada corretamente, as amostras devem ser medidas pelo mesmo arranjo experimental, durante o mesmo intervalo de tempo e devem ter a mesma geometria. Por este motivo, durante o processo de preparação, as amostras foram acondicionadas em frascos de geometria idêntica ao padrão utilizado no LARA.

O padrão de ^{137}Cs utilizado no LARA consiste de uma amostra de 12,80 g de solo seco coletada em Goiânia e calibrado no Laboratório de

Monitoração Ambiental da Eletronuclear S.A. - Angra dos Reis [Anjos, 2000]. Sua atividade em fevereiro de 1999 era de $(35,2 \pm 0,9)$ Bq. O padrão de ^{40}K consiste em uma amostra de 58,13g de dicromato de potássio ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) e sua atividade em outubro de 2003 era de $(136,25 \pm 0,1)$ Bg

Desta forma, o cálculo direto da atividade da amostra desconhecida é feito da seguinte maneira:

$$\frac{\text{Atividade Calibrada}}{\text{Atividade Desconhecida}} = \frac{N^\circ \text{ Líquido de Contagens de } ^{137}\text{Cs da Amostra Calibrada}}{N^\circ \text{ Líquido de Contagens de } ^{137}\text{Cs da Amostra Desconhecida}} \quad (2.15)$$

O número líquido de contagens significa que o valor da integração da região correspondente às contagens do pico de ^{137}Cs deve ser subtraído das contagens do espectro da radiação de fundo, correspondente ao mesmo intervalo de canais onde se encontra o pico estudado no espectro das amostras.

Finalmente, para a determinação das concentrações de ^{137}Cs presentes nas amostras, os valores de atividades obtidos foram normalizados pela massa seca das amostras analisadas. Assim, as concentrações de ^{137}Cs são expressas em unidades de Bq.kg^{-1} .

O decaimento radioativo é um processo aleatório e pode ser descrito por uma distribuição de Poisson quando o número de eventos por unidade de tempo for muito maior que 1. Desta forma, o desvio padrão pode ser calculado através da raiz quadrada do número de eventos.

Assim, para determinar a incerteza dos cálculos realizados para a determinação das concentrações de ^{137}Cs presentes nas amostras, foi efetuada uma propagação de erros para todos os parâmetros envolvidos (números de eventos, massas das amostras etc).

Neste trabalho, as incertezas nas medidas ficaram entre 7% e 10% para as amostras vegetais e em torno de 7% para as amostra de solo.

2.4.3 Limites de Detecção

Limite de detecção é um termo usado para expressar a capacidade de um sistema de medidas. Pasternack e Harley criaram um procedimento para estimar o menor valor de atividade, de um emissor gama, que pode ser observado com qualidade em um sistema que utiliza a técnica de espectroscopia da radiação gama. Este método recebeu o nome de limite inferior de detecção (LLD) [Pasternack, 1991; HASL300, 1997].

Este procedimento permite que a Distribuição de Poisson para o número de contagens provenientes de um emissor de radiação gama, possa ser aproximada a uma distribuição Gaussiana, como a ilustração da Figura 2.15 (a).

O desvio padrão (SD) desta distribuição fornecerá uma estimativa de quão bom uma medida adicional ao fundo se aproximará da medida real. Isto ocorre porque este desvio das contagens pode ser utilizado da mesma maneira que o desvio padrão de uma distribuição Gaussiana. Como exemplo, pode-se observar que quando o intervalo de $\pm 1S_0$ é escolhido, medidas adicionais ocorrerão 68% do tempo. Para um intervalo de $\pm 2S_0$, ocorrem novos eventos 95% do tempo.

Estabelecendo um background e o seu respectivo desvio padrão, pode-se, então, estimar o limite inferior de detecção (LLD).

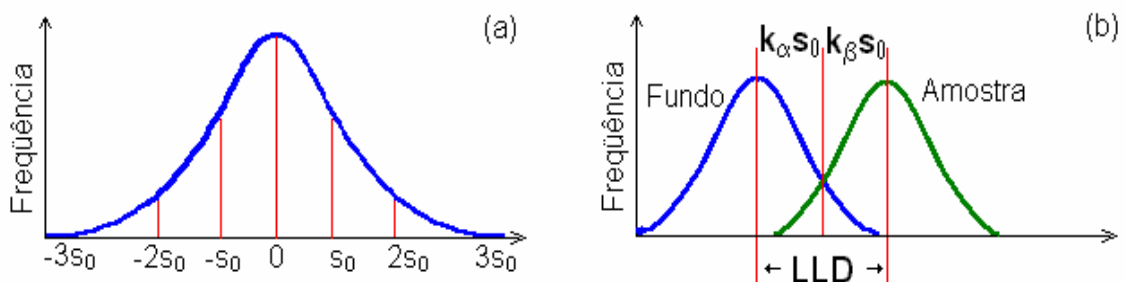


Figura 2.15: (a) Ilustração da curva de uma distribuição Gaussiana e seus respectivos desvios padrões. Em (b), a sobreposição de duas distribuições (fundo e amostra) [HASL300, 1997].

Assim, utilizando a estatística Gaussiana, o limite inferior de detecção (LLD) pode ser representado pela seguinte equação:

$$LLD = \frac{(k_{\alpha} + k_{\beta})}{\varepsilon P_{\gamma}} S_0 \quad (2.9)$$

onde k_{α} é o valor percentual superior de uma variável padronizada que corresponde ao risco de concluir erroneamente que existe atividade na amostra (α); k_{β} é o valor correspondente ao grau de confiança para detectar a presença da atividade ($1-\beta$); S_0 é o desvio padrão da atividade da amostra; ε é a eficiência de contagem de um radionuclídeo com energia específica ($\varepsilon \leq 1$) e; P_{γ} é a probabilidade de transição absoluta por decaimento gama por meio da energia selecionada pelo fator ε (obviamente, $P_{\gamma} \leq 1$).

Uma pequena aproximação pode ser feita se os valores de α e β são da mesma ordem de grandeza e se as atividades da radiação de fundo (background) e a atividade total da amostra (gross) são próximas. Neste caso:

$$S_0 = \sqrt{S_{gross}^2 + S_{bkg}^2} = S_b \sqrt{2} \quad (2.10)$$

Assim, a equação 2.9 fica,

$$LLD \cong \frac{2k\sqrt{2}}{\varepsilon P_{\gamma}} S_b \quad (2.11)$$

A Tabela 2.1 apresenta os valores de k para α 's mais comuns. Normalmente, utiliza-se o valor de 0.05 para α quando o valor de LLD é calculado. O que significa que existe um erro de 5% de concluir errada a atividade da amostra.

Quando são realizadas medidas de radiação gama para amostras de materiais, o termo usualmente associado com o limite de detecção é a concentração mínima detectável (MDC), o qual pode ser expresso por:

$$MDC \cong \frac{4.66S_b}{\varepsilon P_{\gamma} W} \quad (2.12)$$

onde W representa a massa da amostra em kg.

O valor de concentração de ^{137}Cs mínimo detectável para o arranjo experimental utilizado neste experimento foi de $(16 \pm 2) \text{ Bq.kg}^{-1}$. Para amostras que contenham ^{40}K , este valor é de $(13 \pm 2) \text{ Bq.kg}^{-1}$.

Tabela 2.1. Valores de k para α 's mais comuns [HASL300, 1997].

α	$1-\beta$	k	$2k\sqrt{2}$
0.01	0.99	2.327	6.59
0.02	0.98	2.054	5.81
0.05	0.95	1.645	4.66
0.10	0.90	1.282	3.63
0.20	0.80	0.842	2.38
0.50	0.50	0.000	0.00

Capítulo 3

Modelos de Distribuição de ^{137}Cs em Solos e em Vegetais

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os principais aspectos relevantes encontrados na literatura para a distribuição de radionuclídeos no solo e em vegetais superiores. Serão discutidos, também, os mecanismos biológicos que geram a absorção, o transporte e o armazenamento destas substâncias no interior das árvores.

3.1. Modelos de Distribuição Vertical de ^{137}Cs no Solo

Elementos radioativos artificiais têm sido produzidos no meio ambiente desde a década de 40, com a descoberta de fissão atômica e do subsequente desenvolvimento de tecnologias de geração de energia e de bombas nucleares.

Estes resíduos, que em grande parte são constituídos de ^{90}Sr e ^{137}Cs [UNSCEAR, 1993], permitiram a realização de diversos estudos científicos, através da inclusão de uma nova linha de pesquisa denominada de Radioecologia. Por exemplo, no estudo de processos de erosão e sedimentação do solo utilizando-os como traçadores nucleares, o ^{137}Cs tem sido o radioelemento de meia vida longa mais estudado [Walling, 1990a; Walling, 1991; Walling, 1992; Yang, 1998]. Estes trabalhos têm demonstrado que este radioisótopo embora seja fortemente absorvido por vários tipos de solos, apresenta distribuições distintas em função da composição e das características das camadas do solo.

É possível encontrar na literatura vários modelos que têm sido utilizados para calcular estas distribuições de ^{137}Cs nos solos [Quine, 1990; Du, 1998]. Entretanto, serão discutidos a seguir apenas os modelos que considerem a distribuição vertical deste radionuclídeo no solo. A distribuição vertical é uma grandeza muito importante no estudo dos processos de transferência do radionuclídeo do solo para as plantas. Isso por que, conhecendo a concentração de ^{137}Cs em cada centímetro de profundidade, pode ser estabelecida uma relação de absorção, do solo para a planta, se as raízes de um vegetal plantado neste solo estiverem em contato com o material radioativo.

Neste contexto, a distribuição vertical de ^{137}Cs será descrita em dois tipos de solos: *os não perturbados e solos cultivados*.

3.1.1 Solo Não Perturbado

Em geral, a distribuição de ^{137}Cs em um solo não perturbado mostra um comportamento tipicamente exponencial em relação às diversas camadas do solo. A Figura 3.1 ilustra um gráfico típico desta distribuição. Entretanto, é importante ressaltar que a distribuição vertical de um radionuclídeo dependerá principalmente do tipo e da estrutura do solo, onde as proporções de areia, argila e matéria orgânica terão um papel de destaque.

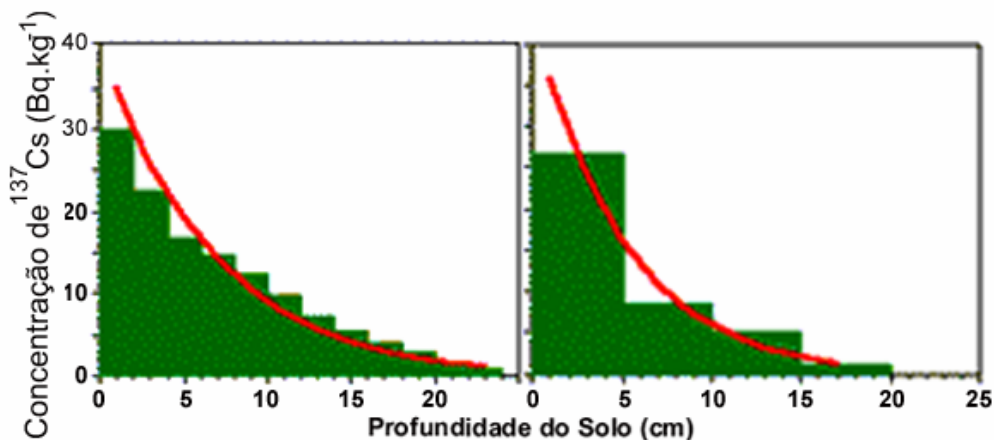


Figura 3.1: Distribuição vertical de ^{137}Cs tipicamente exponencial em solos não perturbados [Quine, 1991, Walling, 1990b]. A curva vermelha apresenta um ajuste de uma função exponencial.

No intuito de investigar distintos comportamentos de distribuição entre os solos não perturbados, foram estudados vários tipos de solo com diferentes concentrações de argila, areia e matéria orgânica. Walling e Quine [Quine, 1992] descreveram em seu trabalho a distribuição vertical de ^{137}Cs em cinco tipos de solos no Reino Unido. Cada tipo de solo foi caracterizado pela proporção de areia, argila e material orgânico. A Figura 3.2 ilustra as distribuições verticais do radionuclídeo nestes tipos de solo.

Desta forma, reunindo os dados encontrados na literatura, Walling e Quine [Quine, 1992] descreveram a distribuição vertical de ^{137}Cs em solos não perturbados. Usando métodos estatísticos, estas distribuições podem ser divididas em três tipos:

a) *exponencial*, que pode ser representada pela equação :

$$Cs = A e^{-bz} \quad (A>0, b>0) \quad (3.1)$$

b) em forma de um *sino*, representada por:

$$Cs = A \left(1 - \left(k - \frac{Z}{H} \right)^b \right) \left(k - \frac{Z}{H} \right)^{b-1} \quad (A>0, b>1 \text{ and } 0 < k \leq 1) \quad (3.2)$$

c) e de *decréscimo suave*:

$$Cs = A \left(1 - \frac{k}{H} \right)^b \quad (A>0, b \geq 0) \quad (3.3)$$

onde o termo Cs representa a concentração de ^{137}Cs em Bq.kg^{-1} ; Z é a profundidade no solo em metros; A , b e k são coeficientes que ajustam as funções utilizadas e H é a espessura do solo no qual o ^{137}Cs pode ser detectado.

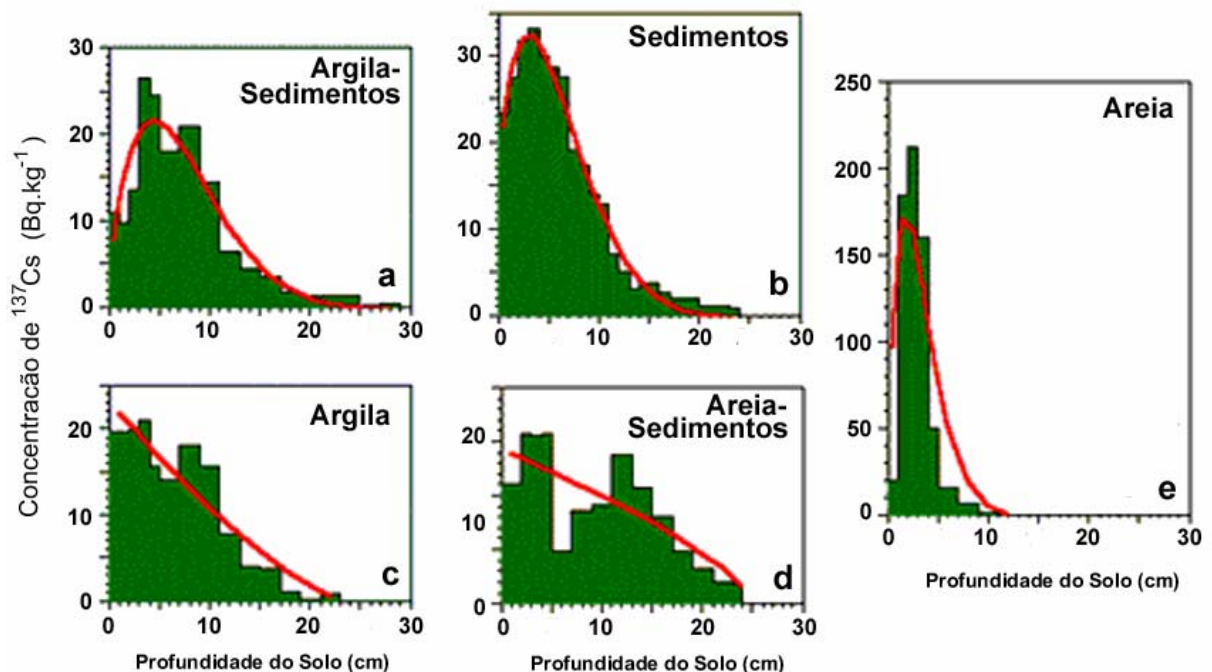


Figura 3.2: Exemplos típicos de distribuição vertical de ^{137}Cs em diferentes tipos de solos: (a) argilas e sedimentos; (b) sedimentos; (c) argila; (d) areia e sedimentos e; (e) areia [Quine, 1992]. As curvas vermelhas representam funções matemáticas que melhor ajustam os dados experimentais.

Ajustes destas equações para alguns tipos de solo também podem ser observados (curvas vermelhas) na Figura 3.2. De uma forma geral, o comportamento “*exponencial*” do ^{137}Cs descreve bem a maioria dos solos argilosos não perturbados e tem sido observado em diversos trabalhos [Takenaka, 1998; Anjos, 2001]. A distribuição de ^{137}Cs em forma de “*sino*” pode ser freqüentemente encontrada em solos não cultivados do tipo arenoso, com cascalho ou rico em matéria orgânica (veja as Figuras 3.2b, 3.2d e 3.2e) [Lance, 1986; Loughran, 1987; McCallan, 1980; Facure, 2001]. A distribuição com a forma de “*decrécimo suave*”, descrita pela Equação 3.3, pode ser encontrada em solos arenosos misturados com sedimentos [Brown 1981; Garcia-Oliva, 1995; McCallan, 1980].

A Equação 3.3 também pode ser utilizada para representar a distribuição de ^{137}Cs em solos cultivados, quando o parâmetro b for igual a 0.5. Quando $b = 1$, a mesma equação adquire um comportamento linear. Esta aproximação linear descreve bem solos cultivados, porém representa apenas um caso bem particular de solo não cultivado.

Desta forma, a distribuição do tipo “*decrécimo suave*” para solos não perturbados é caracterizada pelo fator $b > 1.0$, enquanto que para solos cultivados o parâmetro b assume valores menores que 1.0. No caso particular de $b = 0$, a equação indica que a distribuição é uniforme, característica típica de um solo cultivado, onde o tipo de cultura exige que o solo esteja bem homogêneo.

Assumindo que a distribuição de argila e matéria orgânica no solo seja a mesma, o decaimento exponencial de ^{137}Cs deve ser idêntico para solos do mesmo tipo e estrutura, independente da quantidade de ^{137}Cs . Dados extraídos de Quine *et al.* [Quine, 1994] verificam esta afirmação. A Figura 3.3 mostra o comportamento exponencial semelhante para quatro solos com diferentes contaminações superficiais.

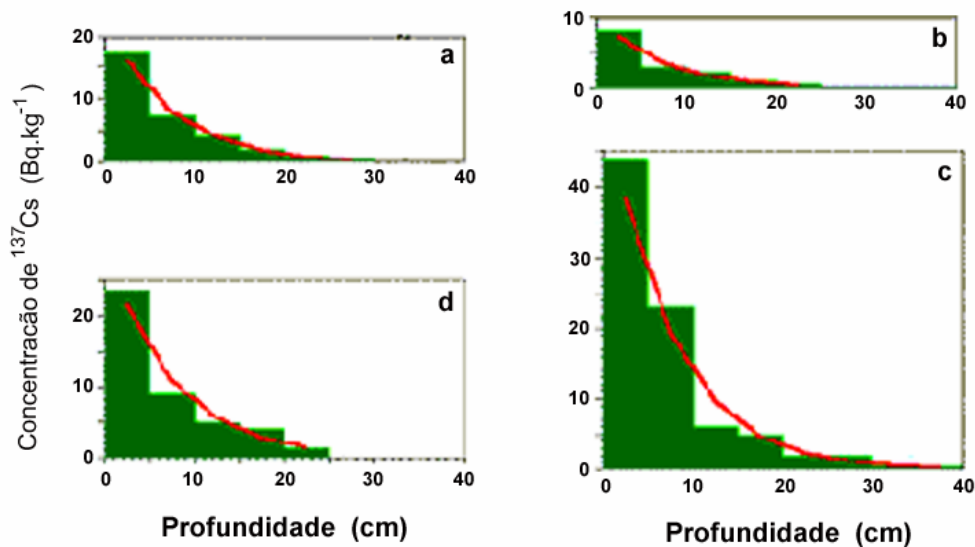


Figura 3.3: Distribuição vertical do tipo exponencial para solos não cultivados com diferentes graus de contaminação de ^{137}Cs [Quine, 1994]. As curvas vermelhas representam funções matemáticas que melhor ajustam os dados experimentais.

3.1.2 Solos Cultivados

No caso de solos onde existe algum tipo de cultura, o solo é preparado para plantação com o auxílio de ferramentas para remexer a terra. Nesta hora em que o solo está sendo beneficiado para seu uso, as concentrações do radionuclídeo estão sendo homogeneizadas também.

Como já foi mencionado anteriormente, quando $b = 0$ as Equações 3.1 e 3.3 tornam-se constantes e diferentes de zero. Dependendo do tipo do trabalho que se quer realizar, esta aproximação é razoável. Entretanto, o ^{137}Cs não é totalmente uniforme em alguns solos cultivados. O expoente $b \neq 0$, que indica o grau do decaimento pode ser calculado em solos cultivados, como pode ser visto na Figura 3.4.

De acordo com as Figuras 3.4a, 3.4b e 3.4c, a distribuição do radionuclídeo é constante nos primeiros 40 cm de profundidade. Entretanto, se em algum trabalho houver a necessidade de se traçar um perfil de solo mais profundo, é preferível utilizar um modelo de decaimento, como na equação 3.3, para modelar a distribuição vertical. Principalmente para casos como o ilustrado na Figura 3.4 b, onde o expoente tem um valor mais alto.

De uma maneira geral, para este trabalho a distribuição vertical de radionuclídeos em solos pode ser classificada, de forma resumida, de acordo como o tipo de uso do terreno. A Figura 3.5 ilustra seis dentre os tipos de ocupação que um terreno pode ter.

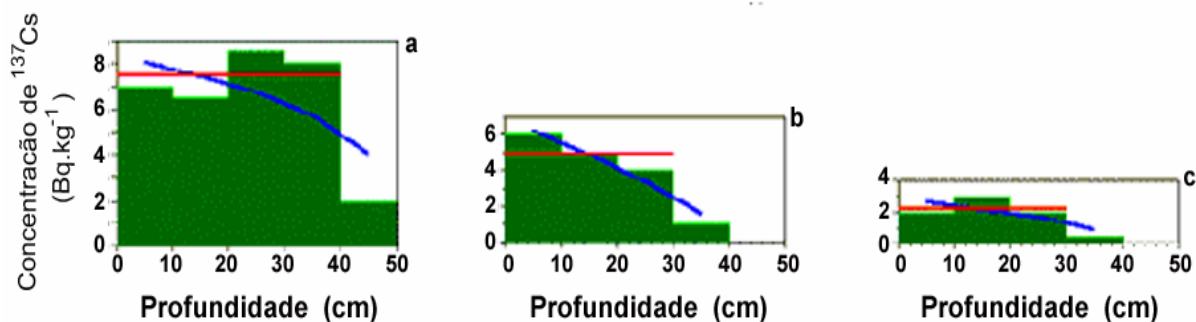


Figura 3.4: Distribuição vertical de ^{137}Cs em solos cultivados [Quine, 1994]. As curvas vermelhas representam ajustes da Equação 3.3 utilizando $b = 0$, enquanto que as curvas azuis representam ajustes utilizando a Equação 3.3, mas com $b \neq 0$. Quanto maior for o valor de b , mais acentuado será o decaimento da distribuição.

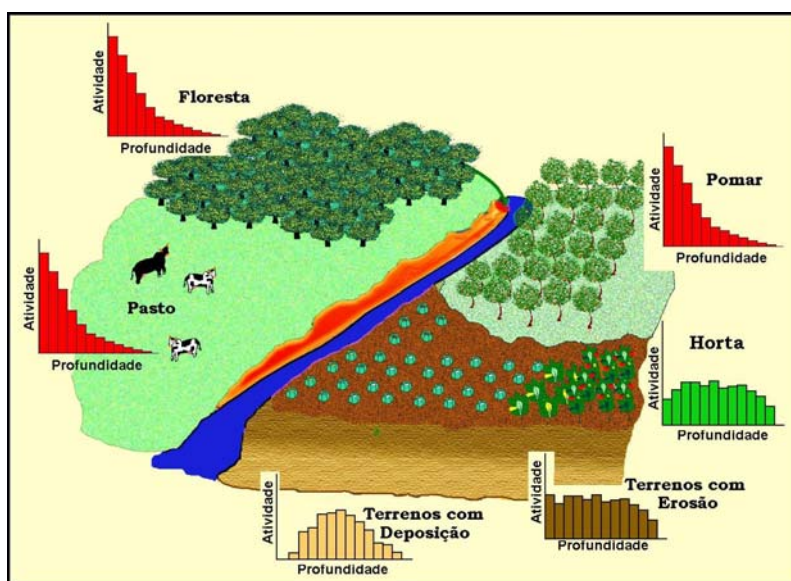


Figura 3.5: Distribuições verticais de ^{137}Cs típicas em terrenos com diferentes tipos de ocupação.

Uma vez conhecido o comportamento do ^{137}Cs no solo, é importante relacionar como este elemento é transferido para os vegetais. Assim, é necessário conhecer um fator que relaciona a concentração deste radioelemento no solo com a respectiva concentração em partes comestíveis de um dado vegetal.

3.2 Taxas de Transferências

A contaminação das partes comestíveis de um vegetal, quando este é cultivado em um solo contaminado por um certo elemento químico, é resultado de uma série de mecanismos biológicos. Estes mecanismos, que ocorrem no interior do vegetal, iniciam-se com a absorção de nutrientes pelas raízes até o transporte de seiva pelas partes aéreas do vegetal. Estes processos afetam a transferência de material radioativo do solo e alguns deles serão discutidos a seguir [Carini, 2001]:

A característica físico-química do solo: A concentração de elementos químicos no solo depende de fatores como pH, umidade, capacidade de troca de cátions (CTC), quantidade de matéria orgânica, atividade microbiológica e tipo de fertilizante aplicado. O fluxo de massa e difusão dos elementos químicos depende apenas da estrutura do solo e sua porosidade.

Interceptação pelas raízes: Em busca de nutrientes, as raízes em crescimento podem entrar em contato com elementos químicos que estejam no solo.

Absorção de íons pelas raízes: A escolha dos íons a serem absorvidos pelas raízes é uma característica do genótipo de cada vegetal. Espécies de plantas se diferenciam consideravelmente pelo seu CTC, isto é, o número de pontos absorvedores de cátions nas paredes celulares. Geralmente, o CTC de espécies monocotiledôneas é muito menor que os de espécies dicotiledôneas (grupo de vegetais da família das angiospermas que tem como uma de suas características uma raiz formada por uma haste principal de sustentação e vários capilares periféricos que absorvem os nutrientes – caso dos vegetais como goiabeiras, mangueiras e abacateiros).

Transporte de íons: O transporte de íons através das membranas das raízes depende especificamente das propriedades físico-químicas do íon. Alguns trabalhos [Shaw, 1991] têm proposto que os íons NH_4^+ , K^+ , Rb^+ e Cs^+ formam uma série homóloga, na qual apresentam um grande grau de semelhanças físico-químicas quando comparados com qualquer outras séries de íons, com a exceção dos halogênios. Os íons de rubídio e césio (Rb^+ e Cs^+)

são escassos na natureza, ao passo que os íons de potássio e amônio (K^+ e NH_4^+) são abundantes nos solos. O íon NH_4^+ pode ser particularmente importante como uma fonte de nitrogênio em solos ácidos não perturbados. Por outro lado, o íon K^+ é um dos principais nutrientes adicionados em solos agrícolas. No caso destes dois últimos íons, estudos mostram que suas taxas de absorção são proporcionais às respectivas concentrações no solo [Hellen, 1991]. Assim, uma vez que o íon de cézio (Cs^+) possui características eletrônicas semelhantes ao potássio e ao amônio, este fato leva a uma competição entre os íons quando se trata de absorção pelas raízes [Hellen, 1991; Shaw, 1991].

Translocação de íons: O transporte de íons em longas distâncias é feito pelo sistema vascular chamado de xilema e floema. No xilema o transporte é unidirecional, enquanto no floema os íons têm um mecanismo de transporte bidirecional. A translocação de íons é feita sempre respeitando as necessidades nutricionais dos vários órgãos ou tecidos do vegetal.

Remanejamento de nutrientes minerais: Remanejamento de minerais das folhas para o tronco (órgãos de armazenamento de nutrientes) é um processo importante que ocorre naturalmente em plantas perenes antes da folha cair. Neste processo um vegetal pode ter vestígios de elementos radioativos em seu caule provenientes de elementos depositados em suas folhas.

Normalmente, estes processos não são estudados individualmente devido à dificuldade de isolamento de uma destas variáveis. Eles são, na verdade, sintetizados em um único parâmetro chamado de *Fator de Transferência*. O fator de transferência, que é comumente chamado de FT, relaciona a concentração de radionuclídeos em certas partes de um vegetal com a concentração do mesmo radionuclídeo no solo. O FT é uma grandeza adimensional e é definido pela razão entre as concentrações (em $Bq.kg^{-1}$ de massa seca) do radionuclídeo no vegetal e no solo [IAEA, 1994]. Assim, no caso especial do radionuclídeo ^{137}Cs , FT pode ser escrito da seguinte forma:

$$FT = \frac{\text{Concentração de } ^{137}Cs \text{ na Planta}}{\text{Concentração de } ^{137}Cs \text{ no Solo}} \quad (3.4)$$

Esta relação é proveniente da utilização de modelos matemáticos de migração de radionuclídeos em ecossistemas florestais, mas que também podem ser facilmente utilizados em ecossistemas agrícolas. Para tanto, se faz assumida uma situação de equilíbrio estático no sistema e, portanto, uma simples equação algébrica (Equação 3.4) pode ser aplicada para descrever a transferência de elementos radioativos do solo para vegetais. Na maioria dos casos, poucos dados são suficientes e uma parametrização pode ser facilmente obtida. Um modelo estático, naturalmente, não pode ser usado num estado de transiente dinâmico numa fase do tipo aguda, mas pode ser usado para descrever uma situação ao longo do tempo após a deposição dos radionuclídeos, isto é, numa fase de equilíbrio quase estático [Ávila, 1998].

Deste modo, o uso dos FTs presume a existência uma linearidade entre a concentração da atividade em plantas e a concentração da atividade total do solo. Entretanto, os mecanismos mencionados anteriormente, e principalmente quando aplicados em ecossistemas agrícolas, podem produzir uma alta variabilidade dos FTs, atingindo variações por fatores de cerca de 25 vezes para plantas jovens cultivadas num mesmo local [Ávila, 1998]. Este fato pode ser sintetizado nos resultados de trabalhos recentes [Simon, 2002], que tem demonstrado que embora a concentração de ^{137}Cs no interior de vegetais aumente com a concentração de ^{137}Cs no solo, a relação entre as duas quantidades não obedece precisamente a uma relação linear, e esta seria apenas uma aproximação.

Outra maneira de expressar a relação entre a concentração do elemento químico no solo e no vegetal é utilizando o *Fator de Transferência Agregado* (FT_{ag}). Este fator é definido como a razão entre a concentração do radioisótopo numa certa parte do ecossistema (Bq.kg^{-1} de massa seca) e a concentração no solo em Bequerel por unidade de área (Bq.m^{-2}) [Frissel, 1997a]. O cálculo feito desta forma tem a vantagem de poder ser aplicado para qualquer componente de um ecossistema, inclusive animais.

Neste trabalho, entretanto, os FTs serão calculados utilizando as concentrações em Bq.kg^{-1} de massa seca, tanto para as amostras de solo quanto as de vegetais. Em geral, estes valores são obtidos a partir de vegetais cultivados em lisímetros, onde é possível produzir solos com concentrações

homogêneas de radionuclídeos [Wasserman, 2002]. Em nosso caso, uma vez que as amostras foram coletadas em um local de acidente radiológico, um perfil do solo será traçado e, conseqüentemente, será determinada a distribuição vertical de ^{137}Cs neste solo. O valor que melhor representa a concentração do radionuclídeo será a média aritmética dos valores encontrados até a profundidade desejada.

A existência de diversos tipos de solos e de vegetação resulta em uma grande variabilidade de valores de FTs para um mesmo radionuclídeo e dificulta a escolha de um valor para este parâmetro, sem superestimar ou subestimar os riscos à exposição radioativa. Entretanto, uma vez que existem poucas informações disponíveis para vegetais tropicais, é interessante o seu estudo com o objetivo de permitir a elaboração de medidas preventivas para o caso de um eventual acidente radiológico ou nuclear no Brasil.

Neste trabalho, o solo utilizado foi coletado em um dos locais do acidente de Goiânia, sendo composto de um solo vermelho (típico da região), apresentando uma grande mistura com restos de materiais de construção em alguns locais. Assim, este é um solo urbano levemente alcalino, provavelmente devido aos resíduos de demolição, e rico em elementos nutritivos.

De acordo com alguns trabalhos [Carini, 2001; Wasserman, 1998; Wasserman, 2002], os vegetais tropicais possuem uma tendência de apresentar fatores de transferência elevados, quando comparados com vegetais cultivados em climas temperados. Com base nessas informações, a Tabela 3.1 apresenta alguns exemplos de FTs de ^{137}Cs encontrados na literatura para frutos normalmente consumidos no Brasil. Estes valores serão utilizados como referências para os cálculos de FTs de ^{137}Cs realizados neste trabalho para a goiaba, manga e abacate, que foram cultivados na cidade de Goiânia.

Tabela 3.1: Fatores de Transferência de ^{137}Cs para alguns frutos [Carini, 2001].

Fruto	FT	Tipo de Solo	Tipo de Contaminação	Tipo de Experimento	Porcentagem de Água (%)
Abacate	1.5×10^{-2}	Argiloso, Arenoso	Fallout	Campo	80
Abacaxi	1.2×10^{-2}	Argiloso, Arenoso	Artificial	Vaso	80
Banana	1.1×10^{-1}	Calcáreo	Fallout	Campo	72
Banana	2.9×10^{-1}	Argiloso, Arenoso	Fallout	Campo	70
Goiaba	1.8×10^{-3}	-	-	-	82
Kiwi	5.2×10^{-3}	Argiloso	Chernobyl	Vaso	80
Laranja	8.8×10^{-4}	Argiloso	Artificial	Vaso	66
Laranja	3.5×10^{-2}	Argiloso, Arenoso	Artificial	Vaso	68
Limão	1.2×10^{-3}	Argiloso	Fallout	Campo	86
Maçã	1.9×10^{-2}	-	-	-	84
Maçã	2.4×10^{-3}	Argiloso	Artificial	Vaso	84
Maçã	4.0×10^{-3}	Argiloso, Arenoso	Fallout	Campo	84
Manga	2.5×10^{-3}	-	-	-	84
Manga	$<7.0 \times 10^{-2}$	Argiloso, Arenoso	Fallout	Campo	71
Melancia	6.0×10^{-4}	Semi-árido	Artificial	Campo	94
Melancia	8.8×10^{-3}	-	-	-	92
Melão	1.0×10^{-3}	-	-	Campo	-
Papaya	1.6	-	Fallout	Campo	80
Papaya	5.9×10^{-1}	Calcáreo	Fallout	Campo	90
Pera	6.0×10^{-3}	Argiloso	Fallout	Campo	-
Pêssego	1.3×10^{-2}	-	-	-	89
Pêssego	9.0×10^{-3}	Argiloso, Arenoso	Fallout	Campo	-

3.3 Distribuição de Radionuclídeos em Vegetais

A distribuição de radionuclídeos nas diferentes partes dos vegetais é um tema de muito interesse no meio científico, sendo um tópico que possibilita diversas aplicações. Uma delas seria o uso dos elementos radioativos como traçadores nucleares para evidenciar algum mecanismo biológico ou mapear uma certa região que sofreu um acidente. Por isso, neste item, serão apresentadas as distribuições radial e longitudinal de radionuclídeos em um vegetal superior, assim como as principais características de cada um dos elementos traçadores.

3.3.1 Distribuição Radial

A distribuição radial de radionuclídeos de meia-vida longa no interior dos troncos das árvores é uma grandeza de grande interesse científico. Isso porque o conhecimento destas concentrações nos anéis de crescimento pode estabelecer um registro temporal de elementos interceptados pelas raízes e, mais importante, de mudanças ocorridas no solo [Momoshima, 1994; Kudo, 1993]. Entretanto, nem todos os elementos radioativos são bons traçadores. Isso porque a distribuição de certos radionuclídeos está relacionada diretamente a propriedades químicas e físicas do elemento. O ^{137}Cs , que tem a meia vida de 30.2 anos, é um exemplo de elemento químico onde é possível a observação de uma migração lateral através do xilema no interior do tronco das árvores.

Alguns elementos, tais como o estrôncio (^{90}Sr) e o plutônio (^{239}Pu ou ^{240}Pu), não apresentam essa mobilidade e por isso são considerados bons indicadores temporais. Eles vêm sendo utilizados para determinar temporalmente um evento ocorrido num dado ecossistema. Um exemplo desta aplicação pode ser visto em Kudo *et al* [Kudo, 1993] e Momoshima *et al* [Momoshima, 1994]. No primeiro trabalho, foram realizadas medidas da concentração de ^{137}Cs , ^{239}Pu e ^{240}Pu nos anéis de crescimento em árvores de uma reserva florestal situada alguns quilômetros a leste de Nagasaki, no

Japão. No segundo, foram medidas as concentrações de ^{137}Cs e ^{90}Sr em uma reserva no estado do Tenessi, EUA.

As Figuras 3.6 e 3.7 ilustram o comportamento destes radionuclídeos nos anéis de crescimento. Pode-se observar, que tanto o plutônio quanto o estrôncio não têm concentrações significativas em anos anteriores a 1945 (quando houve a explosão). O mesmo já não pode se dizer a respeito do césio. Os anéis indicadores de idades anteriores ao incidente apresentam índices de concentração de ^{137}Cs elevados, podendo até ser considerado como uma distribuição constante na maior parte dos anos.

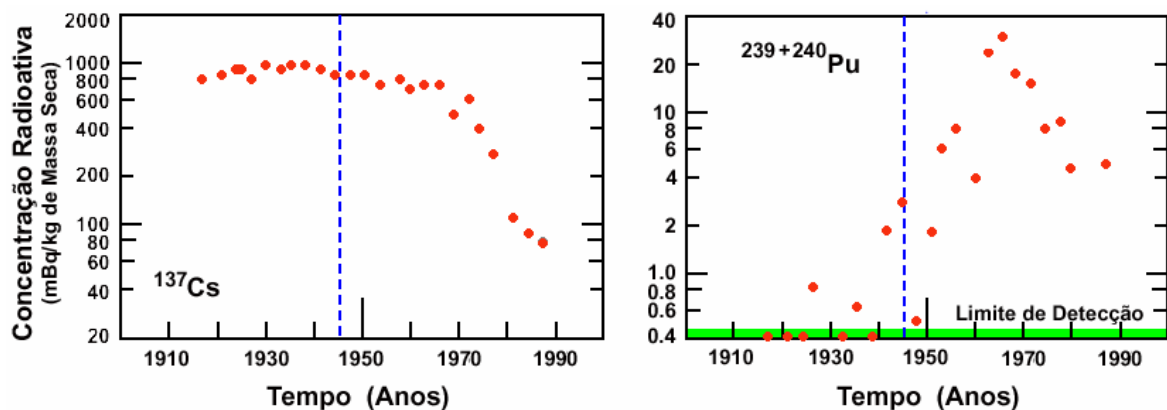


Figura 3.6: Gráficos da distribuição de ^{137}Cs e $^{239+240}\text{Pu}$ nos anéis de crescimento em Nagasaki, Japão. A linha pontilhada azul representa o ano de 1945, quando houve a explosão da bomba em Nagasaki [Kudo, 1993].

O comportamento permeável do ^{137}Cs no interior do tronco das árvores não aconselha a sua utilização como um traçador temporal [IAEA, 1994]. Entretanto, esta aparente desvantagem em relação aos outros elementos mencionados faz do ^{137}Cs um elemento muito interessante de ser estudado. Ao analisar o comportamento do potássio (^{40}K), A. Kudo descreve em seu trabalho [Kudo, 1993] que o comportamento do ^{137}Cs é similar ao comportamento do potássio (natural ou ^{40}K). A Figura 3.8 mostra o gráfico da distribuição de ^{40}K ao lado da distribuição de ^{137}Cs .

O potássio é um nutriente essencial para a maioria das árvores. Ele é absorvido pelas raízes sob a forma de íon (^+K) e, por isso, é natural encontrar potássio no interior dos tecidos vegetais. Entretanto, por terem características eletrônicas semelhantes ao potássio, o ^{137}Cs é também absorvido pelo vegetal

sob a forma de íon [Shaw, 1991; Hellen, 1991]. Outros trabalhos mostram, também, a competição entre estes dois elementos [Shultz, 1965; Livens, 1988; Hass, 1995] onde os íons livres que estão presentes no solo são absorvidos pelas raízes.

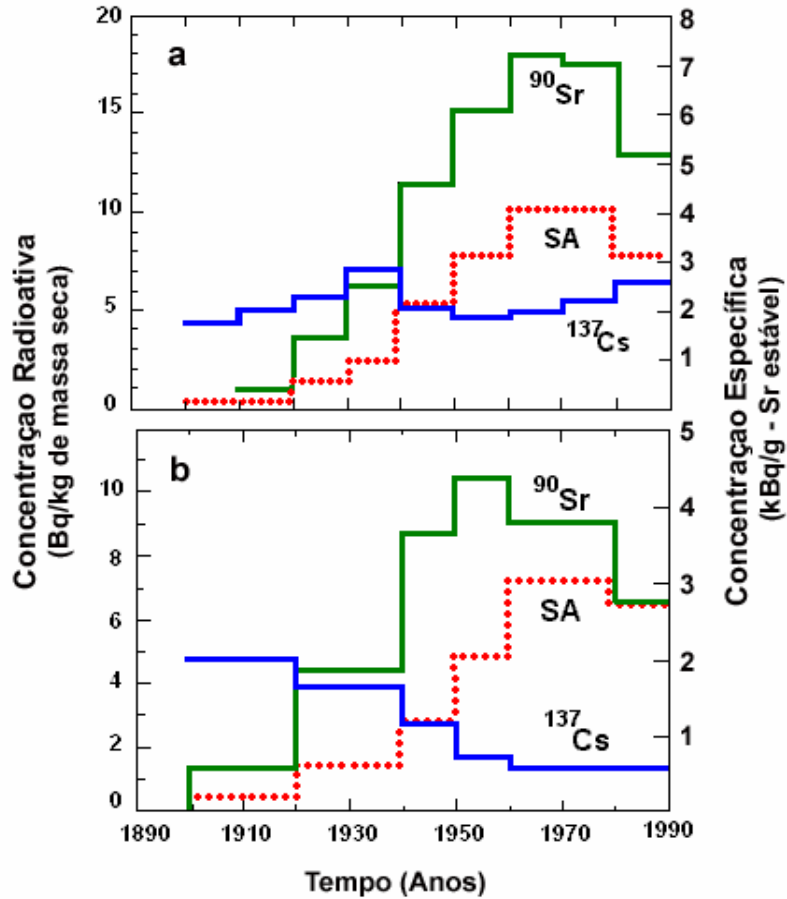


Figura 3.7: Gráfico da distribuição radial de césio (linha azul), estrôncio (linha verde) e da atividade específica (SA) de estrôncio radioativo por estrôncio estável (pontilhado vermelho) em duas espécies de árvores da família das coníferas: (a) Red Spruce e (b) Eastern Hemlock [Momoshima, 1994].

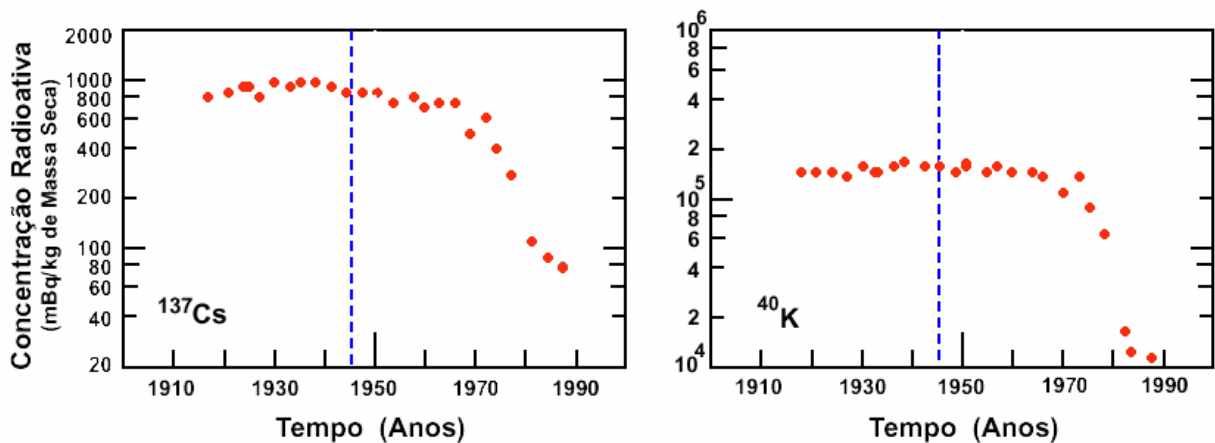


Figura3.8 : Gráficos da distribuição radial de ^{137}Cs e de ^{40}K no interior do mesmo tronco de uma árvore [Kudo, 1993].

As árvores estudadas por Kudo *et al* [Kudo, 1993] e Momoshima *et al* [Momoshima, 1994] eram árvores da família das coníferas, com idades superiores a 60 anos e com seções retas de, aproximadamente, 50 cm de diâmetros a 1 m do solo. Os anéis etários destas árvores são, normalmente, bem definidos e simétricos e, por isso, são facilmente identificáveis. A Figura 3.9 mostra duas fotografias de seções retas de árvores deste tipo. Nela podem-se observar com facilidade os anéis.



Figura 3.9: Fotografias de uma seção reta de um tronco de uma árvore da família das coníferas. Pode-se observar com clareza a simetria dos anéis etários [Grissino, 2004].

Para coletar as amostras dos anéis de crescimento, foram cortados discos do tronco principal, tais como os ilustrados na Figura 3.9. Em cada disco, com a ajuda de um formão, uma única amostra de cada anel foi coletada. E, a este anel foi associado a uma idade da árvore. Desta forma, só foi possível analisar as concentrações médias dos radionuclídeos em cada anel.

É possível estudar a distribuição radial utilizando outro procedimento. Este método consiste em coletar as amostras dos anéis de crescimento utilizando um instrumento semelhante a um “perfurador de cocos”, o qual retira do tronco da árvore uma peça de madeira de simetria cilíndrica. Esta peça é, por sua vez, dividida em pequenas partes referentes aos anos de idade da árvore. A vantagem deste método é permitir que uma árvore seja analisada e,

mesmo assim, continue viva. Entretanto, os resultados encontrados são, novamente, concentrações médias de radionuclídeos em cada anel.

Com o intuito de observar o comportamento do ^{137}Cs no interior dos vegetais, este trabalho propõe a utilização de um método diferente de coleta de amostras. Como já foi dito no Capítulo 2, cada disco do tronco principal será dividido em anéis correspondentes a uma única idade do vegetal. Este anel, então, será dividido em seções menores. Assim, a mobilidade do radionuclídeo poderá ser estudada não só entre os anéis etários, mas também no interior dos mesmos. Como resultado, cada amostra de disco poderá ser vista em duas dimensões.

3.3.2 Distribuição Longitudinal

Outra maneira de investigar o comportamento de um elemento químico no interior de um vegetal é estudando a sua distribuição longitudinal. A distribuição longitudinal consiste em um mapeamento da concentração do radionuclídeo ao longo de todo o sistema vascular do vegetal, começando desde a análise das raízes, passando pelo tronco principal e galhos intermediários e finalizando com as folhas e frutos mais altos. Desta forma é possível identificar regiões preferenciais de acúmulo de radioelementos assim como estudar o transporte, a distribuição e o remanejamento destes radionuclídeos em todo o sistema vascular de um vegetal.

Em um de seus trabalhos, Carini e Lombi [Carini, 1997] estudam a distribuição longitudinal de ^{134}Cs e ^{85}Sr em videiras de uvas. O estudo da concentração destes radionuclídeos nas folhas, frutos, caule e raízes desta videira é feito utilizando dois processos de contaminação. Em um deles a contaminação do vegetal se dá por via terrestre, onde o radionuclídeo é diluído no solo e, posteriormente, é absorvido pelas raízes, sob a forma de íons. No segundo processo, a contaminação é feita pulverizando o elemento radioativo sob a plantação, simulando, assim, o efeito *fallout*. Desta forma, as folhas serão a porta de entrada do radionuclídeo, que será deslocado para o interior do caule utilizando um mecanismo de transporte de nutrientes chamado de

translocação. Na translocação, os elementos absorvidos são deslocados diretamente das folhas para o interior dos tecidos vegetais, dando preferência àqueles que tenham menor concentração da substância.

Este tipo de simulação feita por Carini e Lombi é de grande interesse em estudos de radioecologia. Isso porque possibilita estimar não somente a absorção e o transporte de substâncias radioativas em uma contaminação do solo, mas também permite determinar a distribuição do radionuclídeo caso a contaminação aconteça por deposição foliar, tal como é o efeito *fallout*.

As Figuras 3.10 (a e b) ilustram a distribuição de ^{134}Cs em ambos os casos simulados. Observando as porcentagens relativas aos frutos, folhas, caule e raízes, pode-se perceber a mobilidade deste radionuclídeo tanto para contaminação aérea, quanto terrestre. No primeiro caso, onde a contaminação se dá através do solo, os frutos recebem 33% de todo o ^{134}Cs absorvido pela planta. As folhas e os brotos somam, juntos, 18% do total. Desta forma, o conjunto formado pelas folhas, frutos e brotos é responsável por 51% de todo o ^{134}Cs absorvido pelo vegetal.

No segundo caso, o ^{134}Cs absorvido pela superfície das folhas é distribuído de forma que os frutos recebem uma quantidade ainda maior do elemento (48%) que, somados aos brotos e folhas, resultam em 80% de todo o ^{134}Cs absorvido. Este resultado reforça uma tendência de que as partes mais jovens de um vegetal concentram maior quantidade deste radioelemento [Fogh, 2001].

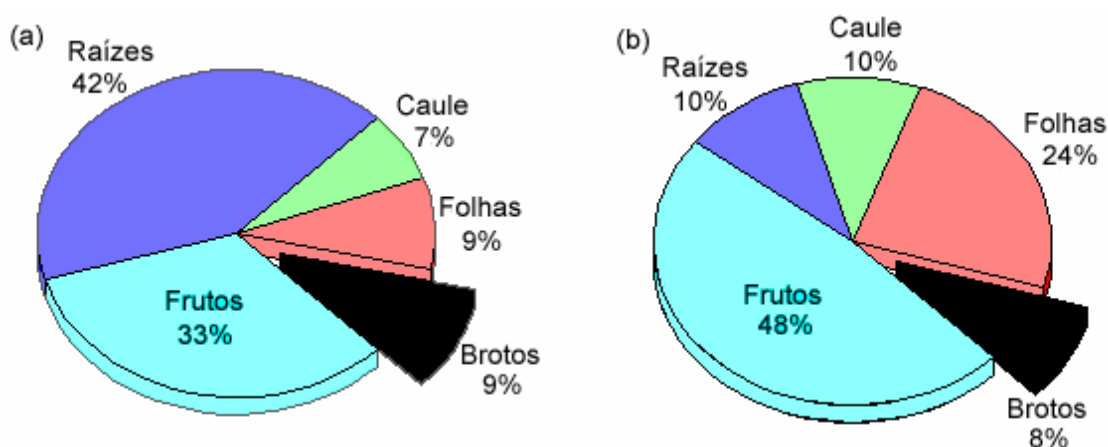


Figura 3.10: Gráficos da distribuição de ^{134}Cs nas partes de uma árvore. A figura (a) representa a distribuição quando a contaminação se dá através do solo. Em (b) a contaminação se dá através das folhas [Carini, 1997].

O comportamento do ^{85}Sr também foi estudado nestes dois casos. Diferentemente do césio, o ^{85}Sr se apresenta sob a forma de um íon bi-valente (^{++}Sr). Os íons bi-valentes são menos absorvidos que os monovalentes [Carini, 1997]. Por este motivo, o ^{85}Sr apresenta uma distribuição pelo vegetal bem diferente do césio (que forma íons monovalentes ^{+}Cs). As Figuras 3.11 (a e b) ilustram estas distribuições. Nelas é possível notar o grande acúmulo deste radionuclídeo nas folhas, independente do tipo de contaminação ser aérea ou terrestre.

Empregando o mesmo procedimento utilizado por Carini e Lombi, Sabbarese e colaboradores [Sabbarese, 2002] mostram, em seu trabalho, a distribuição longitudinal de radionuclídeos em tomateiros via contaminação aérea e terrestre. Neste trabalho, entretanto, serão estudados as distribuições de césio, potássio e cobalto (^{137}Cs , ^{40}K e ^{60}Co).

Os gráficos da Figura 3.12 ilustram as respectivas concentrações destes radioelementos nas folhas, frutos, caule e raízes do vegetal. Nesta mesma figura, é possível comparar as concentrações dos mesmos radioelementos quando estão em sua forma natural, sem a presença dos elementos contaminantes.

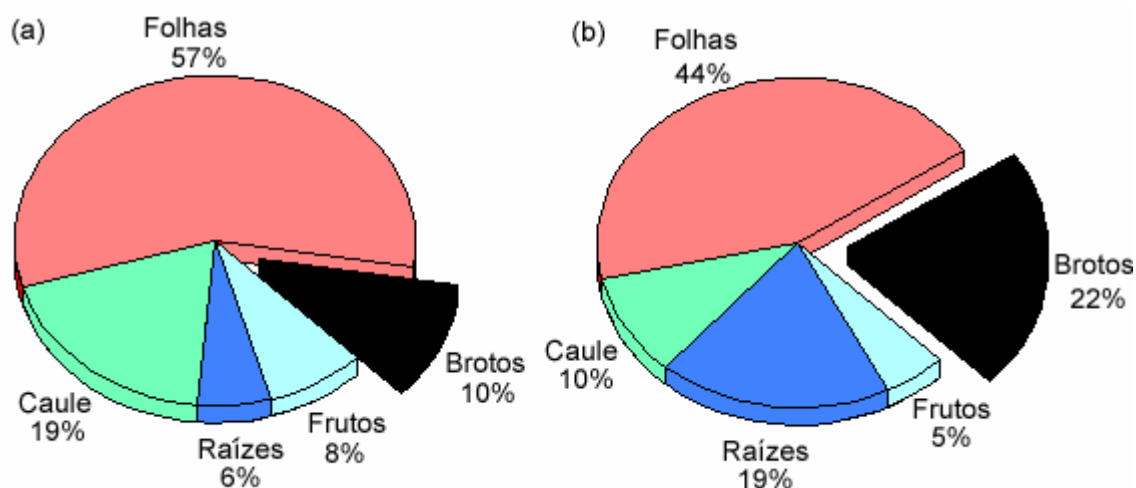


Figura 3.11: Gráficos da distribuição de ^{85}Sr nas partes de uma videira de uvas. A figura (a) representa a distribuição quando a contaminação se dá através das folhas. Em (b) a contaminação se dá através do solo [Carini, 1997].

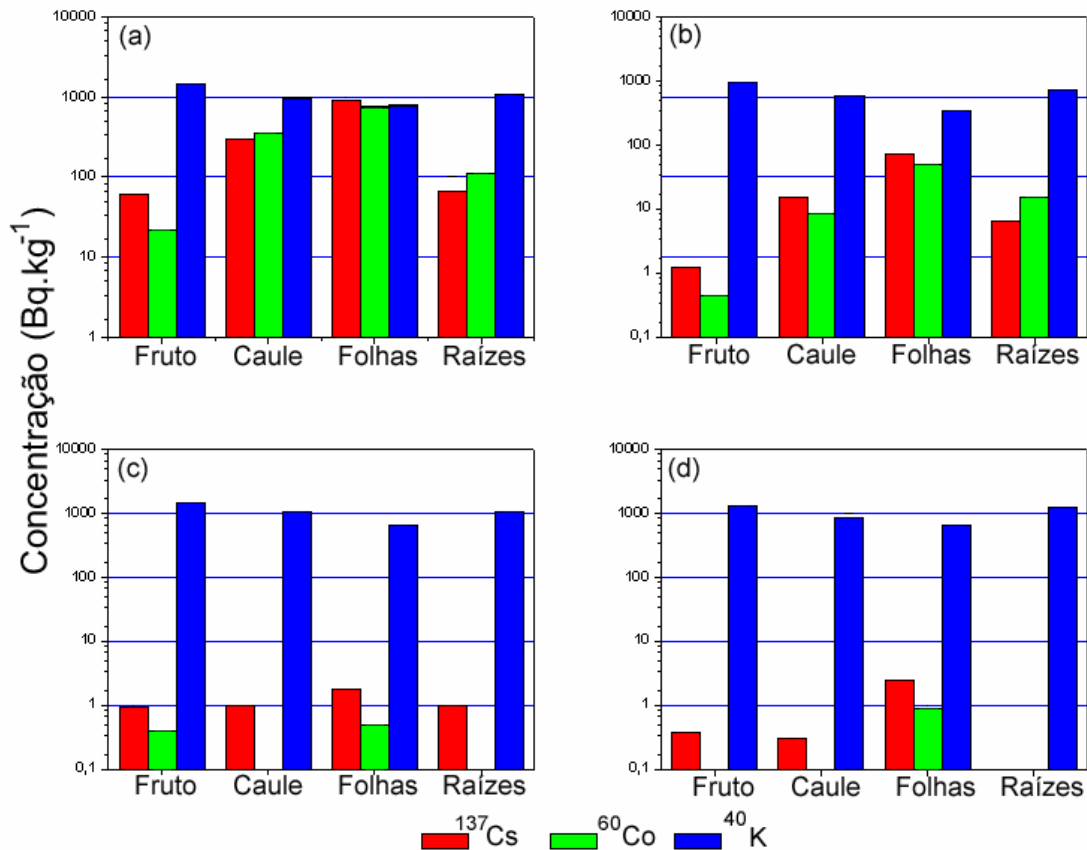


Figura 3.12: Gráficos da concentração de radionuclídeos em tomateiros para diferentes tipos de contaminação. Em (a) foi feita irrigação aérea utilizando água contaminada por ^{137}Cs e ^{40}K , em (b) irrigação terrestre utilizando a mesma água. Em (c) e (d) os tomateiros foram irrigados via aérea e terrestre com água “limpa”, respectivamente [Sabbarese, 2002].

A análise dos resultados mostra que o ^{137}Cs em tomates tem um comportamento semelhante ao encontrado para o ^{134}Cs nas videiras de uvas. A maior concentração se encontra nas folhas e caules. O que vem a confirmar um resultado já previsto por Fogh e colaboradores [Fogh, 2001] que afirmam, em seu trabalho, que a concentração de ^{137}Cs é maior sempre nas partes mais jovens das árvores (frutos, brotos, folhas entre outras).

De acordo com o apresentado, o potássio é um nutriente vegetal e o céσιο possui a habilidade de substituir este elemento durante o processo de absorção de nutrientes pelo vegetal. Com base nesta constatação, o ^{137}Cs pode ser usado como um radionuclídeo rastreador da distribuição de nutrientes no interior de um vegetal. Assim, os próximos capítulos terão por objetivo a compreensão do comportamento fisiológico e o estudo de suas possíveis correlações com o transporte de nutrientes em árvores frutíferas tropicais.

Capítulo 4

Resultados e Discussões

Após compreender o funcionamento dos instrumentos utilizados no Laboratório de Radioecologia da UFF (LARA), dominar as técnicas de medição e preparação de amostras, as atividades específicas de ^{137}Cs podem ser encontradas.

Dando continuidade a este trabalho, neste capítulo serão apresentados os valores obtidos para as concentrações de ^{137}Cs presentes nas amostras de solo, frutos, folhas, caules e raízes das árvores pesquisadas neste trabalho.

4.1 Distribuição Vertical de ^{137}Cs no Solo

De acordo com a descrição feita no Capítulo 2, as amostras de solo foram coletadas o mais próximo possível de cada árvore estudada. A Figura 2.1 ilustra a posição no terreno em que cada árvore está situada. A partir destas amostras, os perfis do solo no entorno de cada árvore estudada foram traçados. As Figuras 4.1 (a, b, c e d) mostram os gráficos das distribuições de ^{137}Cs em função da profundidade do solo nas proximidades das goiabeiras (G1) e (G2), da mangueira (M) e do abacateiro (A1), respectivamente.

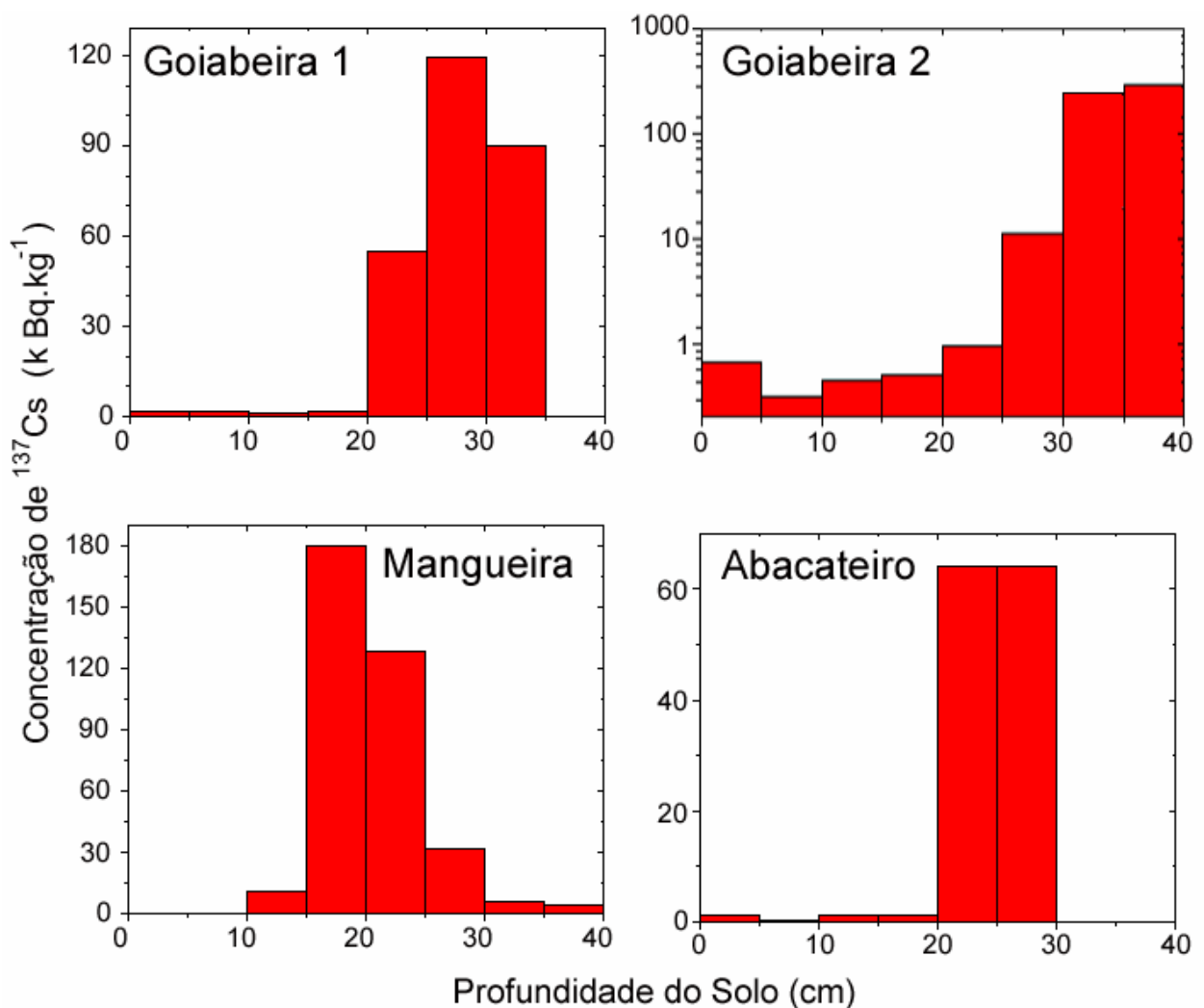


Figura 4.1: Gráficos das distribuições verticais de ^{137}Cs no solo. Em (a) está o perfil de solo para a goiabeira (G1); em (b) da goiabeira (G2); em (c) da mangueira (M) e em (d) o perfil do abacateiro (A1).

Como medida de proteção radiológica pessoal, a coleta das amostras de solo foi monitorada por um detector do tipo Geiger-Müller. A cada camada de solo removida o detector era introduzido na cavidade do perfil, produzindo, assim, uma medida rápida dos níveis de radiação a uma determinada profundidade. Foi adotado como limite máximo de taxa de dose o valor de $25 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ para que uma a perfuração fosse interrompida. Entretanto, não foram obtidos valores significativamente superiores a este limite. Com isso, um fator que realmente impossibilitou uma perfuração mais profunda do solo foi a constatação da presença de restos de materiais de construção em camadas do subsolo. Nos casos do abacateiro (A1) e das goiabeiras (G1) e (G2) a grande quantidade de pedras e entulho existentes no subsolo não permitiram que fossem retiradas amostras de solo em camadas mais profundas. Assim, os seus perfis de solo apresentados na Figura 4.1, representam as melhores medidas obtidas para cada caso. Em especial, para o caso do abacateiro, não foi possível obter uma perfuração abaixo de 30 cm de profundidade.

A concentração mais alta de ^{137}Cs foi observada no perfil de solo da goiabeira (G2). A amostra de terra, que se encontrava em uma camada de solo entre 35 - 40 cm de profundidade, apresentou uma atividade específica de $(290 \pm 18) \text{ kBq}\cdot\text{kg}^{-1}$. Este valor excede em quase 13 vezes o *nível de ação* de $22.5 \text{ kBq}\cdot\text{kg}^{-1}$ proposto pela CNEN para a descontaminação dos locais do acidente [IAEA,1988].

De acordo com os modelos apresentados no Capítulo 3, sobre as distribuições verticais de ^{137}Cs no solo, este deveria ser um solo arenoso e bem sedimentado. Entretanto, a forma de *sino* encontrada para estes perfis se deve a intervenções que aconteceram na época do acidente pela CNEN. Possivelmente, durante o processo de descontaminação, camadas de terra e entulho contaminados foram cobertas por uma grossa camada de terra “limpa”. Esta nova camada de terra serviria para isolar o material radioativo no subsolo. Então, ao traçar um perfil de solo neste local, é comum observar uma baixa concentração de ^{137}Cs nas primeiras camadas de solo em relação à superfície. Enquanto que a partir de uma certa profundidade (entre 10 e 20 cm da superfície) uma camada contaminada começa a aparecer, revelando elevados valores de atividade deste radionuclídeo. Ultrapassando a camada de entulho,

pode-se observar a forma exponencial da distribuição de ^{137}Cs . Esta forma é típica de um solo argiloso não perturbado. Este fato pode ser nitidamente observado na Figura 4.1.c. Adicionalmente, a Figura 4.2 mostra uma foto do solo retirada do local estudado. Nela, pode ser observada a camada de entulho a poucos centímetros da superfície.



Figura 4.2: Foto da camada de entulho contaminado por ^{137}Cs a poucos centímetros da superfície do terreno estudado [Facure, 2001c].

A fim de que fosse possível estudar os fatores de transferência (FT) de ^{137}Cs do solo para as folhas, frutos e outras partes dos vegetais, algumas aproximações das distribuições de concentrações de ^{137}Cs no subsolo foram consideradas. Isto se deve ao fato das amostras coletadas estarem num local de acidente e, portanto, a distribuição de radionuclídeos não era homogênea. Estas aproximações tiveram o objetivo de levar em conta as distribuições das raízes dos vegetais em relação ao solo contaminando. Para tanto, foi suposto que as raízes das árvores estudadas encontravam-se predominantemente nas camadas do subsolo mais contaminadas. Uma vez que o modelo de taxa de

transferência de radionuclídeos do solo para a planta adotado pela IAEA [IAEA, 1994] possui uma dependência linear entre as respectivas concentrações, foi necessário obter um valor médio para concentração de ^{137}Cs no solo.

Usualmente, estes valores de taxa de transferência são obtidos através de plantações em lisímetros, que permitem uma distribuição homogênea da substância radioativa no solo. Mas como não existem muitos valores na literatura de FT para árvores frutíferas tropicais, estes valores foram determinados com o objetivo de enriquecer estas informações. Desta forma, a Tabela 4.1 apresenta os valores médios da concentração de ^{137}Cs no solo correspondente a cada tipo de árvore analisada, que serão utilizados para o cálculo dos respectivos valores de FT.

Tabela 4.1: Concentrações médias de ^{137}Cs em Bq.kg^{-1} de solo seco para as árvores estudadas. As incertezas para as concentrações são representadas pelo desvio padrão da média.

Espécie de vegetal	Concentração média de ^{137}Cs no solo (kBq.kg^{-1})
Goiabeira (G1)	88 ± 22
Goiabeira (G2)	190 ± 113
Mangueira (M)	113 ± 56
Abacateiro (A1)	43 ± 28

4.2 Fator de Transferência

Por relacionar a contaminação no solo com as partes comestíveis de um vegetal, o fator de transferência é considerado uma grandeza muito importante. De uma maneira geral, o cálculo dos FTs é feito preparando o solo de forma que o radionuclídeo esteja distribuído homogêneo e, normalmente, são calculados para as partes comestíveis de um vegetal.

Entretanto, neste trabalho, além dos frutos, serão utilizados como base para o cálculo dos FTs as folhas das goiabeiras, do abacateiro e da mangueira. Estes valores podem ser observados nas Tabelas 4.3 a 4.6 do Item 4.4 deste Capítulo, o qual apresenta os resultados para as concentrações de ^{137}Cs em várias partes destes vegetais.

Analisando os frutos e folhas destes vegetais, foram obtidos valores das concentrações de ^{137}Cs em cada uma das amostras de frutos e folhas. Entretanto, para cada árvore, foi utilizado um valor de atividade específica que melhor representasse a concentração de ^{137}Cs naquela parte do vegetal. Este valor será a média aritmética das concentrações de cada tipo de amostras. Desta forma, cada árvore terá uma concentração média de ^{137}Cs para seus frutos e outra para suas folhas. Assim, utilizando a Equação 3.4 e juntamente com as medidas das concentrações no solo (Tabela 4.1), valores para as respectivas taxas de transferências foram obtidos. Estes resultados podem ser observados na Tabela 4.2.

De acordo com a Tabela 4.2, nota-se que os valores de FT para os frutos e para as folhas são muito próximos. Desta forma, embora não tenha sido possível coletar amostras de fruto de abacateiro, pode-se esperar que o valor de FT para os abacates deva ser próximo de $(3,2 \pm 2,3) \times 10^{-2}$.

Comparando-se os valores de FT apresentados na Tabela 3.1, observa-se um bom acordo entre os resultados deste trabalho com os encontrados na literatura para o abacateiro e para a mangueira. Contudo, valores de FT mostrados na Tabela 4.2 para as amostras de duas goiabeiras são aproximadamente treze vezes maiores que os encontrados na literatura. Embora, este não seja o método adequado de se obter valores de FT, uma vez que uma distribuição heterogênea do radionuclídeo no solo produz uma incerteza muito elevada devido à dificuldade de relacionar a extensão das raízes dos vegetais com a distribuição de ^{137}Cs no solo, pode-se dizer que qualitativamente os valores de FT para estas três árvores frutíferas tropicais estão bem representados. Além disso, ao contrário do que está descrito na literatura, uma goiabeira e um abacateiro produziriam frutos mais contaminados que uma mangueira se estas três árvores estivessem sendo cultivadas num solo com a mesma concentração de ^{137}Cs . Assim, no caso específico do solo

estudado neste trabalho, o consumo elevado de uma mesma quantidade de goiabas e abacates poderia produzir danos mais sérios para a saúde humana que o mesmo consumo de mangas.

Tabela 4.2: Valores médios das concentrações de ^{137}Cs em frutos e folhas das árvores estudadas e seus respectivos fatores de transferência. As incertezas para as concentrações são representadas pelo desvio padrão da média.

Espécie de vegetal		Concentração de ^{137}Cs (kBq,kg ⁻¹)	Fator de Transferência
Goiabeira (G1)	Folha	(2,0 ± 0,2)	(2,3 ± 0,8) x 10 ⁻²
	Fruto	(2,0 ± 0,2)	(2,3 ± 0,8) x 10 ⁻²
Goiabeira (G2)	Folha	(3,7 ± 0,4)	(1,9 ± 1,3) x 10 ⁻²
	Fruto	(4,4 ± 0,4)	(2,3 ± 1,5) x 10 ⁻²
Mangueira (M)	Folha	(1,7 ± 0,2) x 10 ⁻¹	(1,5 ± 0,9) x 10 ⁻³
	Fruto	(2,8 ± 0,3) x 10 ⁻¹	(2,4 ± 1,4) x 10 ⁻³
Abacateiro (A1)	Folhas	(1,4 ± 0,1)	(3,2 ± 2,3) x 10 ⁻²
	Frutos	-	-

4.3 Distribuição Radial

No Capítulo 3, foi discutido como a distribuição radial é uma importante ferramenta para a compreensão de certos fenômenos da natureza de um vegetal. Para tal estudo, a análise das concentrações de radioisótopos em amostras de tecido vegetal é imprescindível. Por isso, foram coletadas amostras do caule principal das goiabeiras (G1) e (G2). Entretanto, o método utilizado neste trabalho não permite a sobrevivência da árvore após a coleta destas amostras. Por este motivo, serão apresentadas as distribuições radiais somente das duas goiabeiras.

Independente da realização deste estudo, estas árvores foram removidas do terreno. Seus frutos apresentavam concentrações de ^{137}Cs acima do permitido. Desta forma, o corte do caule principal destas goiabeiras não representou uma perda maior, do ponto de vista ambiental. A mangueira (M) e o abacateiro (A1) não apresentavam este problema e, por este motivo, não foram extraídas.

No Item 3.3.1 do Capítulo 3, foram mostrados alguns trabalhos [Momoshima, 1994; Kudo, 1993] onde era mapeada a distribuição deste radionuclídeo no interior do caule de árvores do tipo coníferas. Estas distribuições eram apresentadas na forma de gráficos ou histogramas unidimensionais. Um resultado importante encontrado foi o comportamento móvel do ^{137}Cs no interior dos caules destas árvores, revelando que o céσιο pode se mover entre os anéis de crescimento das árvores, sendo que, em alguns casos, o céσιο se distribui radialmente de forma constante no interior do caule de uma árvore. Por outro lado, Fogh e colaboradores [Fogh, 2001] demonstraram que para árvores cultivadas em solo contaminado, o ^{137}Cs tende a se acumular nas partes mais jovens do vegetal. Entretanto, o que nunca foi observado é se existem regiões específicas da árvore onde este elemento químico se acumula.

Com o intuito de comparar os dados obtidos neste trabalho com os encontrados na literatura, inicialmente foram feitos gráficos da distribuição de ^{137}Cs em função dos anéis de crescimentos identificados nas goiabeiras (G1) e (G2). Como cada anel de crescimento foi subdividido em várias amostras, os valores médios das concentrações do radionuclídeo foram determinados para cada anel observado. Assim, as Figuras 4.3 e 4.4 ilustram os gráficos para estas distribuições de ^{137}Cs em função dos anéis de crescimentos identificados nas goiabeiras (G1) e (G2), respectivamente.

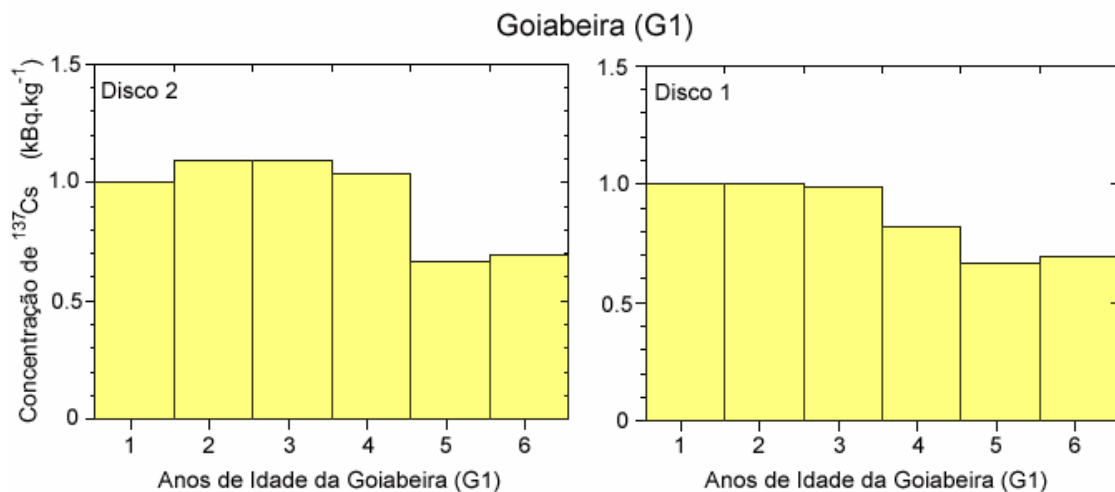


Figura 4.3: Gráficos unidimensionais da distribuição radial de ^{137}Cs na goiabeira (G1). O Disco 2 é o disco mais alto e o Disco 1, o mais próximo ao solo.

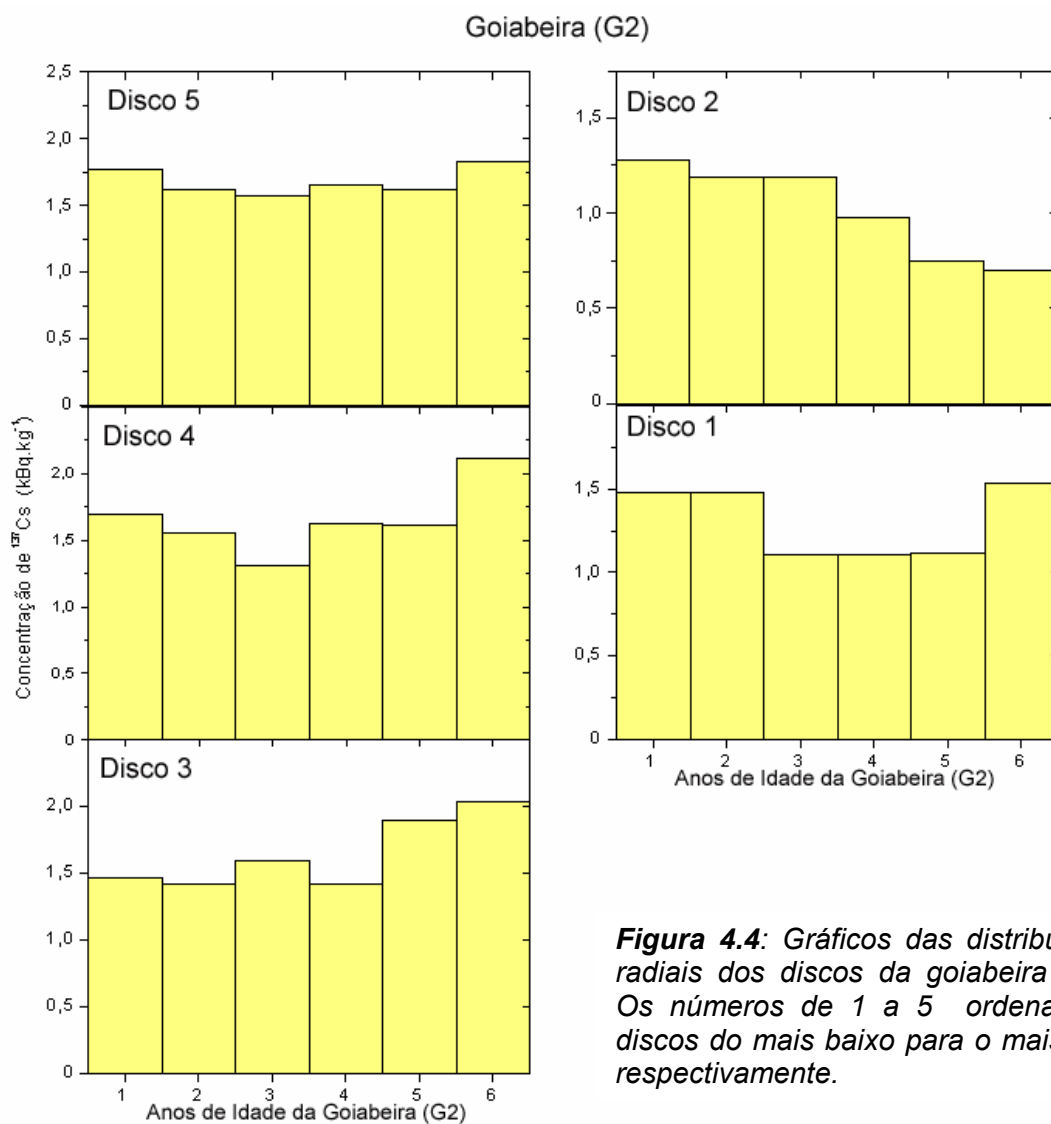


Figura 4.4: Gráficos das distribuições radiais dos discos da goiabeira (G2). Os números de 1 a 5 ordenam os discos do mais baixo para o mais alto, respectivamente.

De acordo com as Figura 4.3, foram observados seis anéis de crescimentos nos discos da goiabeira (G1), revelando-se tratar de uma árvore com cerca de seis anos de idade e, portanto, cultivada por toda a sua vida em solo contaminando de ^{137}Cs . Esta informação é corroborada pela observação deste radionuclídeo pelos anéis desta árvore. Além disso, pode ser observada uma concentração de ^{137}Cs preferencialmente no centro da distribuição radial de ambos os discos.

A Figura 4.4 apresenta os resultados da análise dos 5 discos da goiabeira (G2). Esta também era uma árvore com cerca de 6 anos de idade e, diferentemente da goiabeira (G1), a distribuição do radionuclídeo tende a se acumular no centro da distribuição apenas para o disco 2, não sendo observado nenhuma relação entre o aumento da altura dos discos em relação ao solo e a preferência no acúmulo deste elemento. Pode ser observado, no entanto, uma mobilidade ou deslocamento mais pronunciado na direção dos anéis mais externos da árvore para os discos mais altos, concordando com os resultados de Fogh e colaboradores [Fogh, 2001].

A utilização dos métodos de preparação dos discos descritos no Capítulo 2 permite que a distribuição radial de ^{137}Cs no interior dos troncos de ambas as goiabeiras possa ser vista por todo o plano do disco em análise, que é a proposta deste trabalho. Assim, a distribuição radial da goiabeira (G2) é mostrada nas Figuras 4.5, 4.6 e 4.7. Estes gráficos estão ordenados por altura das amostras em relação ao solo e representam os cinco discos extraídos do caule principal desta goiabeira. Desta forma, a Figura 4.5 apresenta o disco 1 (mais próximo ao solo), na Figura 4.6 estão os discos 2 e 3 (intermediários) e, na Figura 4.7 estão os disco mais altos em relação ao solo. As diversas cores utilizadas, que variam desde o vermelho intenso até o azul mais escuro, simbolizam as diferentes faixas de concentrações do radionuclídeo.

Observando-se cada disco em separado, como não há faixas de regiões circulares com uma concentração constante, pode-se dizer que não ocorre uma distribuição homogênea ou simétrica desta substância radioativa dentro de cada anel de crescimento. Assim, a análise individual dos discos não revela um comportamento padrão para o acúmulo de ^{137}Cs em uma região específica do caule. Em alguns casos o radionuclídeo está concentrado

preferencialmente no centro, enquanto em outros, ele está na borda do tronco. O que se pode perceber é que para o disco mais próximo ao solo, existe um aumento da concentração de ^{137}Cs no seu centro, enquanto que os discos mais altos, há um acúmulo do radionuclídeo em um dos lados.

Os discos da goiabeira (G1) foram tratados da mesma forma que os discos da goiabeira (G2). Deste modo, a distribuição radial do ^{137}Cs nos dois discos da goiabeira (G1) pode ser observada na Figura 4.8. Estes gráficos reforçam a idéia de que não existe uma região preferencial de acúmulo do radionuclídeo neste tipo de árvore.

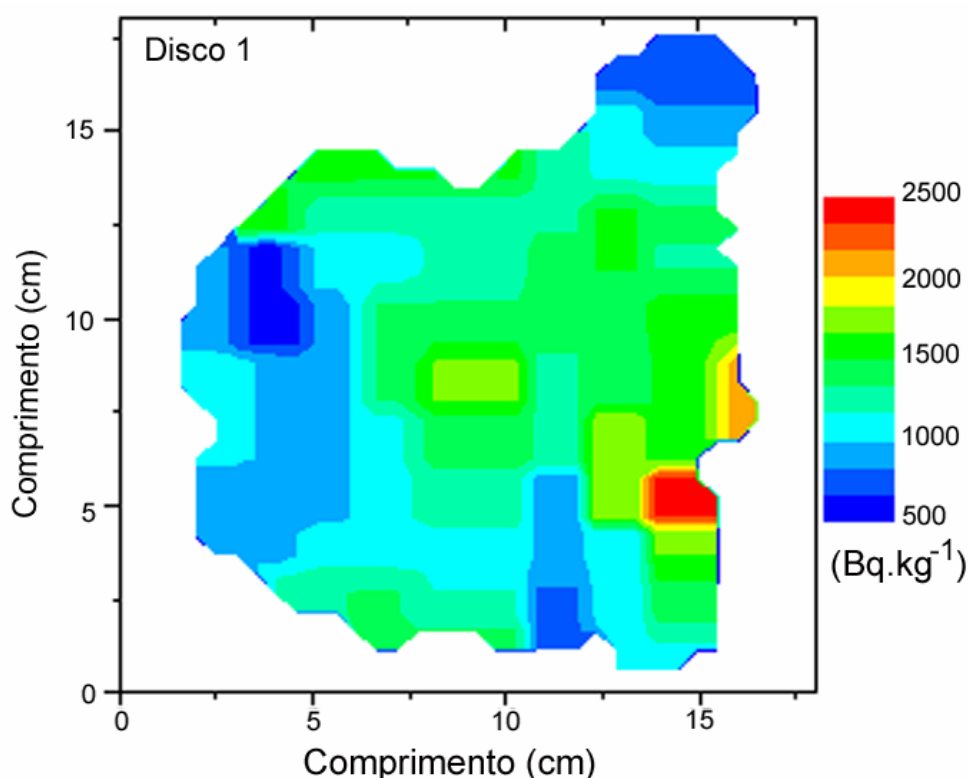


Figura 4.5: Gráfico da distribuição radial de ^{137}Cs no interior do tronco da goiabeira (G2). Este é o Disco 1 do caule principal, que fica mais próximo ao solo.

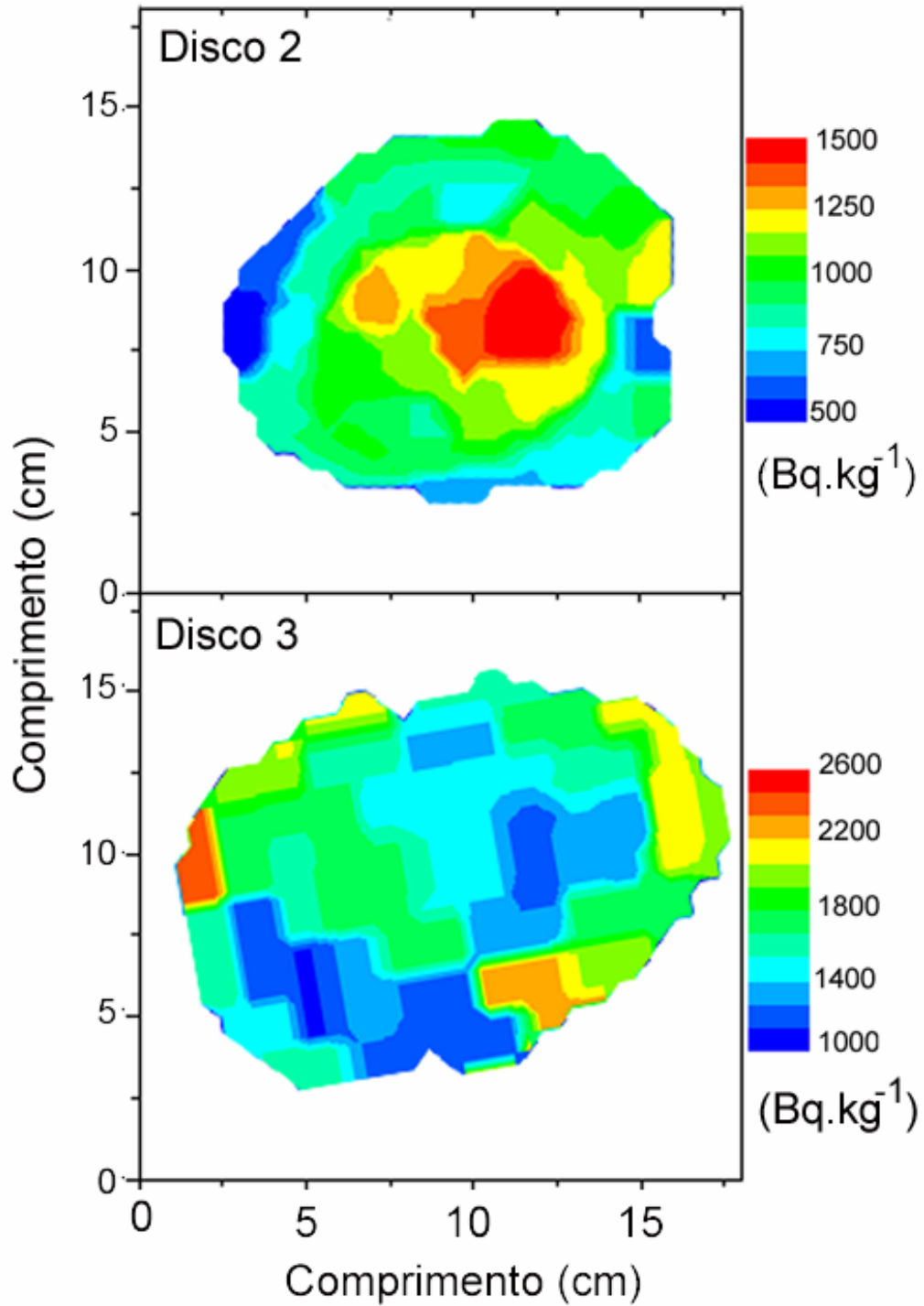


Figura 4.6: Gráficos da distribuição radial de ^{137}Cs no interior do tronco da goiabeira (G2). Estes são os Discos 2 e 3 do caule principal.

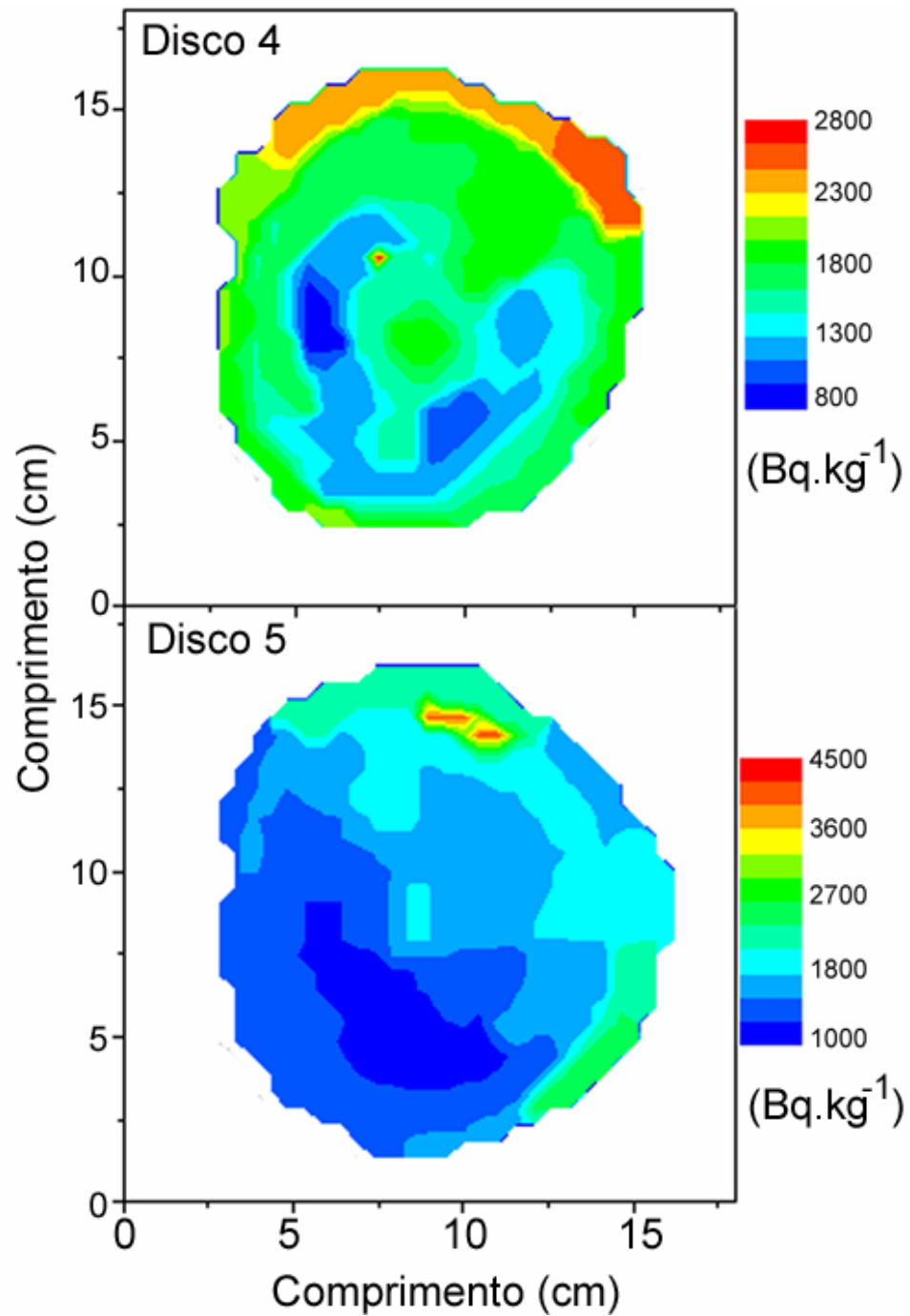


Figura 4.7: Gráfico da distribuição radial de ^{137}Cs no interior do tronco da goiabeira (G2). Estes são os Discos 4 e 5 do caule principal, os mais altos em relação ao solo.

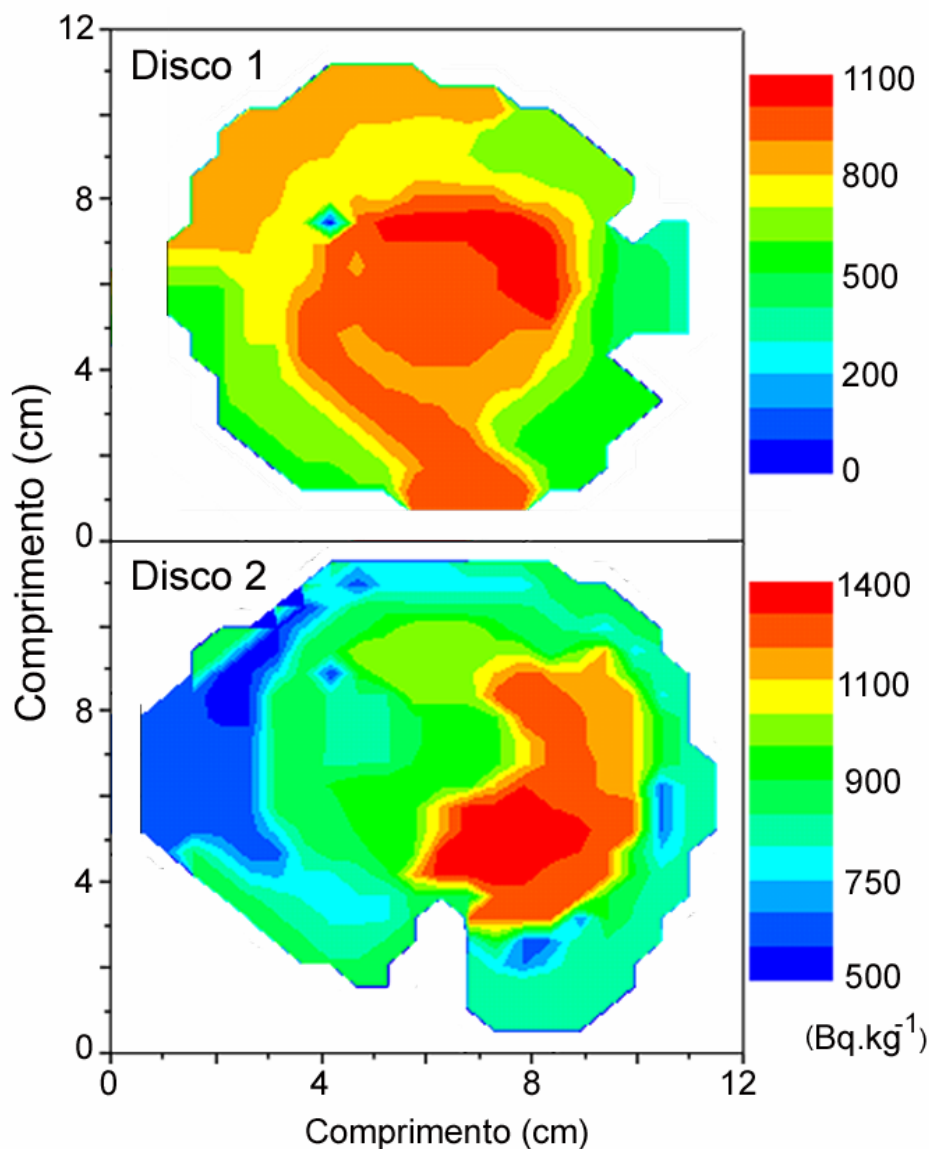


Figura 4.8: Gráficos da distribuição radial de ^{137}Cs no interior dos anéis de crescimento da goiabeira (G1). As concentrações do radionuclídeo são dadas em Bq.kg^{-1} . O Disco 1 está mais próximo da superfície do solo.

Estas observações ficam mais evidentes, quando a identificação dos anéis de crescimento são sobrepostos a estes diagramas de distribuição radial de ^{137}Cs . A Figura 4.9 apresenta a ilustração de três diagramas bidimensionais da goiabeira (G2), com a localização dos anéis de crescimento. Assim, ao contrário de uma análise unidimensional, estes diagramas permitem a observação de que, dentro de um mesmo anel, existe uma considerável variação na concentração de ^{137}Cs .

Goiabeira (G2)

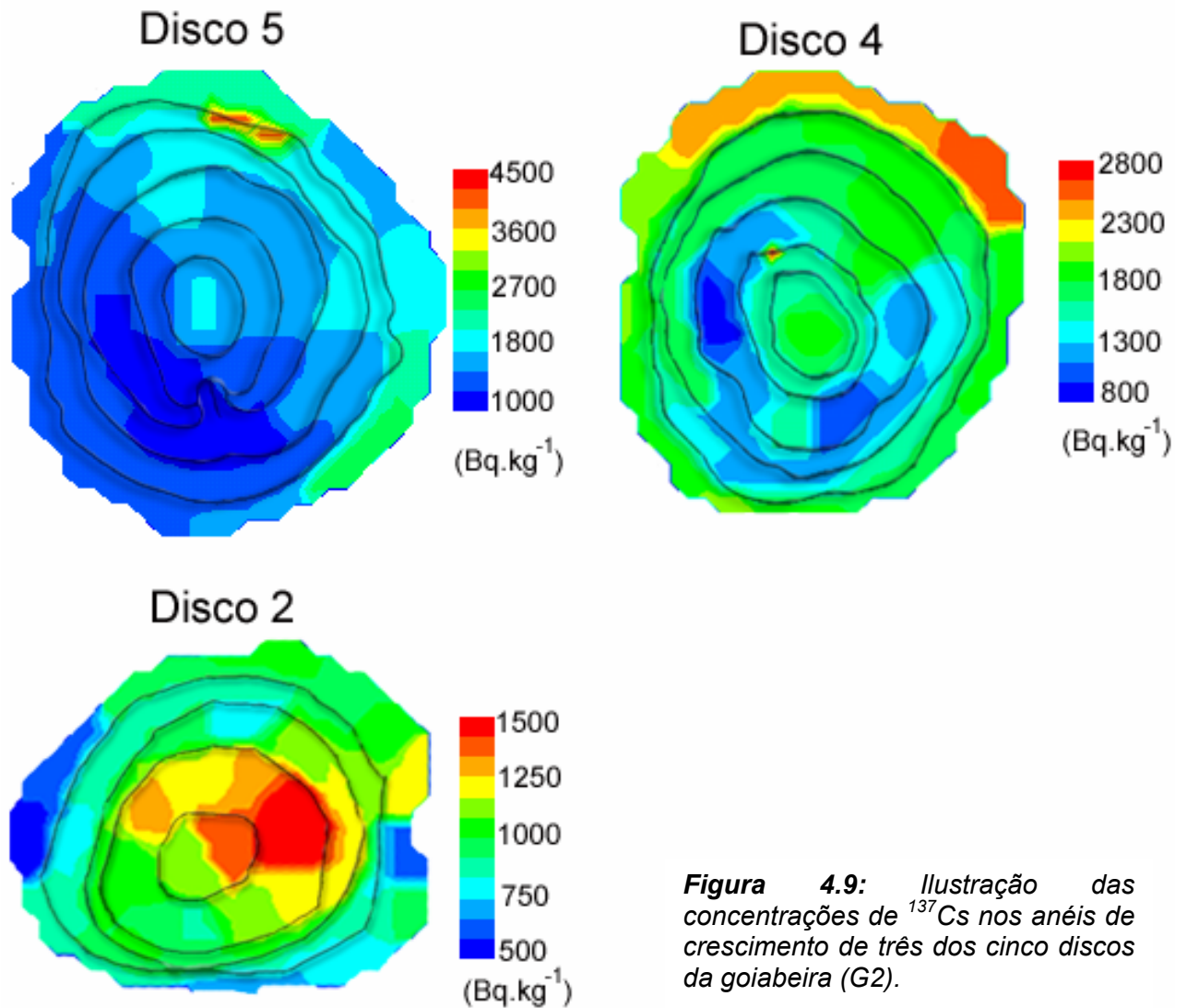
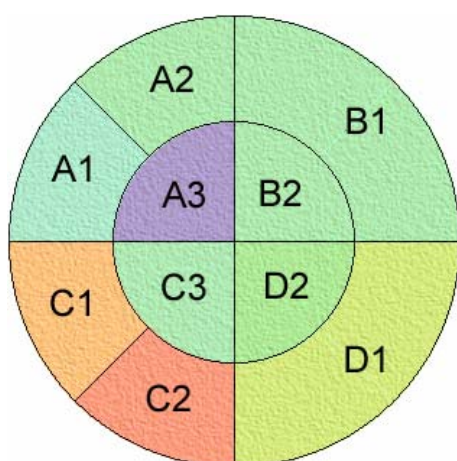


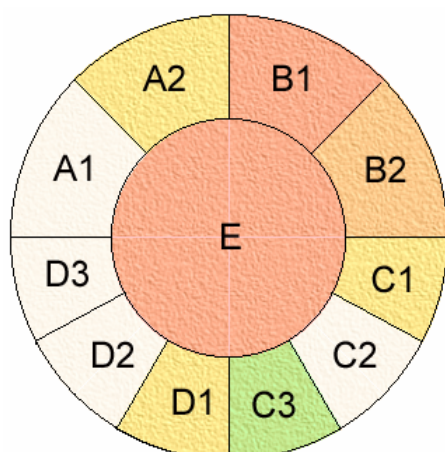
Figura 4.9: Ilustração das concentrações de ^{137}Cs nos anéis de crescimento de três dos cinco discos da goiabeira (G2).

Embora não tenha sido possível coletar amostras de discos do caule principal da mangueira (M) e do Abacateiro (A1), a análise da distribuição radial de ^{137}Cs também pôde ser realizada. O material utilizado para este propósito foi, para cada uma das árvores, uma amostra do caule secundário, escolhida especialmente por apresentar o maior diâmetro. Mesmo seguindo este critério, não foi possível estudar detalhadamente os vários anéis, uma vez que não havia quantidades significativas de material de cada anel individual. Assim, os discos do caule secundário foram divididos de acordo com as Figuras 4.10 e 4.11. Estas figuras apresentam a localização e o valor da concentração de ^{137}Cs em um dos caules secundários do Abacateiro (A1) e da mangueira (M), respectivamente.



Amostr a	Concentração de ^{137}Cs (10^2 Bq,kg^{-1})	Amostra	Concentração de ^{137}Cs (10^2 Bq,kg^{-1})
A1	$5,0 \pm 0,4$	C1	$6,3 \pm 0,6$
A2	$5,1 \pm 0,4$	C2	$6,4 \pm 0,6$
A3	$4,4 \pm 0,4$	C3	$5,1 \pm 0,4$
B1	$5,0 \pm 0,4$	D1	$5,9 \pm 0,5$
B2	$3,9 \pm 0,3$	D2	$4,0 \pm 0,4$

Figura 4.10: Ilustração das posições das amostras radiais do abacateiro (A1). Este disco possuía cerca de 5 cm de diâmetro. A tabela ao lado mostra os valores das concentrações de ^{137}Cs em Bq.kg^{-1} para cada amostra do tronco 1 do abacateiro.



Amostra	Concentração de ^{137}Cs (Bq,kg^{-1})	Amostra	Concentração de ^{137}Cs (Bq,kg^{-1})
A1	$8,9 \pm 0,8 \times 10^1$	C3	$1,9 \pm 0,2 \times 10^2$
A2	$2,0 \pm 0,2 \times 10^2$	D1	$2,4 \pm 0,2 \times 10^2$
B1	$3,0 \pm 0,3 \times 10^2$	D2	$6,6 \pm 0,6 \times 10^1$
B2	$2,3 \pm 0,2 \times 10^2$	D3	$2,8 \pm 0,3 \times 10^1$
C1	$2,4 \pm 0,2 \times 10^2$	E	$3,3 \pm 0,3 \times 10^2$
C2	$6,6 \pm 0,6 \times 10^1$		

Figura 4.11: Ilustração das amostras radiais da mangueira (M). Este disco possuía cerca de 6 cm de diâmetro. A tabela ao lado mostra os valores das concentrações de ^{137}Cs em Bq.kg^{-1} para cada amostra do tronco 3 da mangueira.

Observando-se as Figuras 4.10 e 4.11, nota-se que também há um acúmulo de ^{137}Cs em uma das bordas do caule secundário, destacando a existência de uma diferença nas concentrações de ^{137}Cs no interior do caule destas árvores frutíferas. Esta observação reforça a idéia de que o ^{137}Cs se acumula em certas regiões específicas do caule de uma árvore. Assim, a visualização em gráficos de duas dimensões se faz necessário para uma correta interpretação dos dados.

4.4 Distribuição Longitudinal

O uso de traçadores nucleares, que apresentam certa mobilidade no interior do sistema vascular de um vegetal, possibilita o estudo de mecanismos de transporte de substâncias em uma árvore e identifica regiões onde estes elementos serão concentrados (folhas, frutos, caule, raízes etc). Por isso, para completar a análise destes vegetais, será feito o estudo do comportamento do radionuclídeo ao longo das diferentes partes das goiabeiras, do abacateiro e da mangueira. A distribuição longitudinal tem como objetivo relacionar a concentração do ^{137}Cs nas folhas, frutos, caule e raízes.

Os discos das goiabeiras (G1) e (G2), além de contribuírem para estudo da distribuição radial, podem, também, ser analisados longitudinalmente. Para isto, é necessário colocá-los na mesma escala. Da maneira como eles foram apresentados nas Figuras 4.5 a 4.8, só é possível fazer uma análise da distribuição radial de cada um deles, já que cada um possui a sua própria escala de cores. Assim, as Figuras 4.12 e 4.13 ilustram os discos destas duas goiabeiras, todos com a mesma escala de atividade específica de ^{137}Cs .

Tanto na goiabeira (G1) quanto na (G2) é possível notar que os discos mais próximos ao solo possuem regiões de menor concentração de ^{137}Cs que os mais altos. É possível observar, também, que nos discos mais altos é mais evidente a migração do radionuclídeo para um dos lados do caule. O que reforça a idéia proposta no item anterior de regiões do caule que são preferenciais para o acúmulo de césio.

Goiabeira (G2)

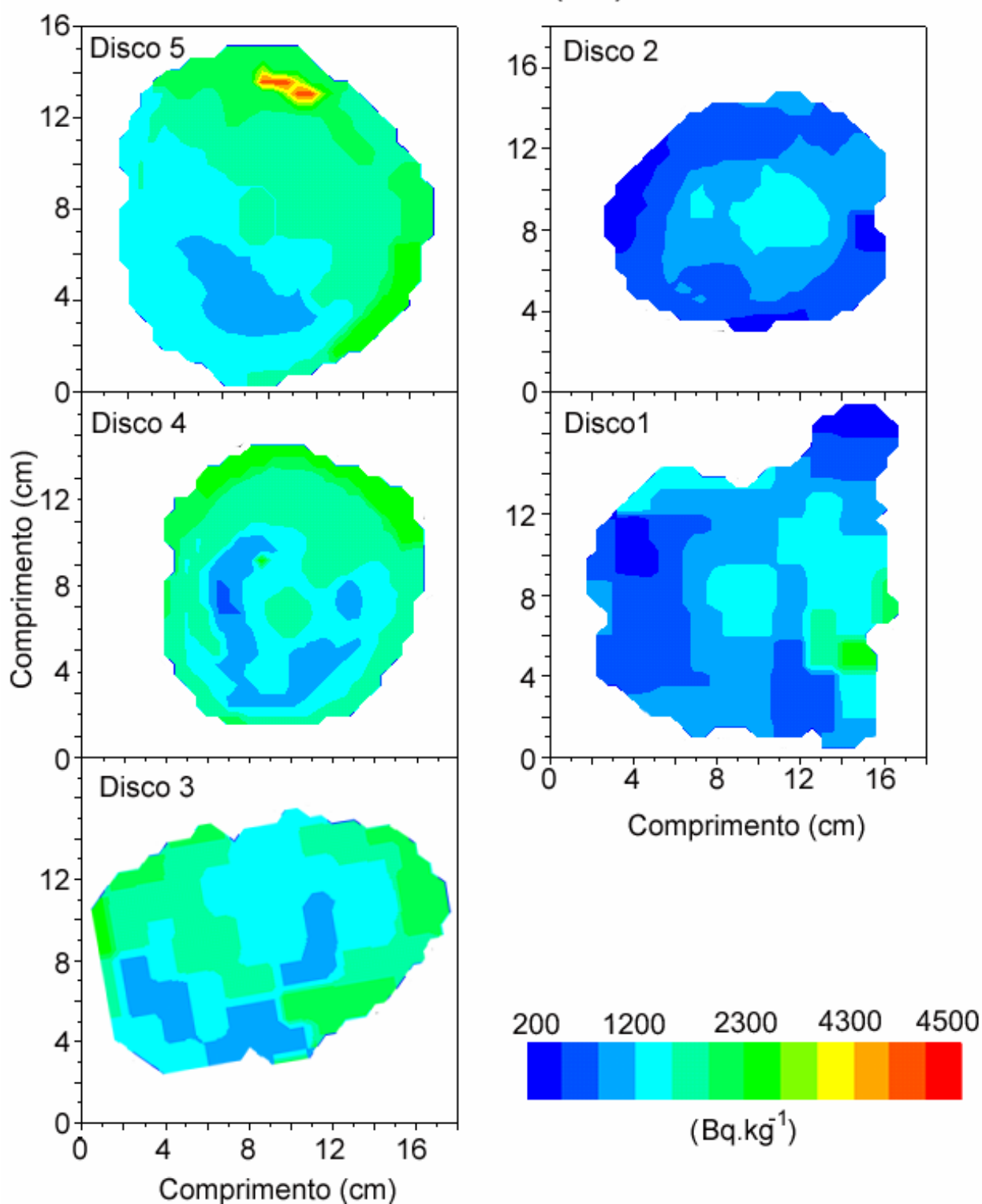


Figura 4.12: Gráficos bidimensionais das concentrações de ^{137}Cs nos discos da goiabeira (G2). Esta figura ilustra a distribuição longitudinal do radionuclídeo. A figura é apresentada em ordem decrescente de altura do disco em relação ao solo.

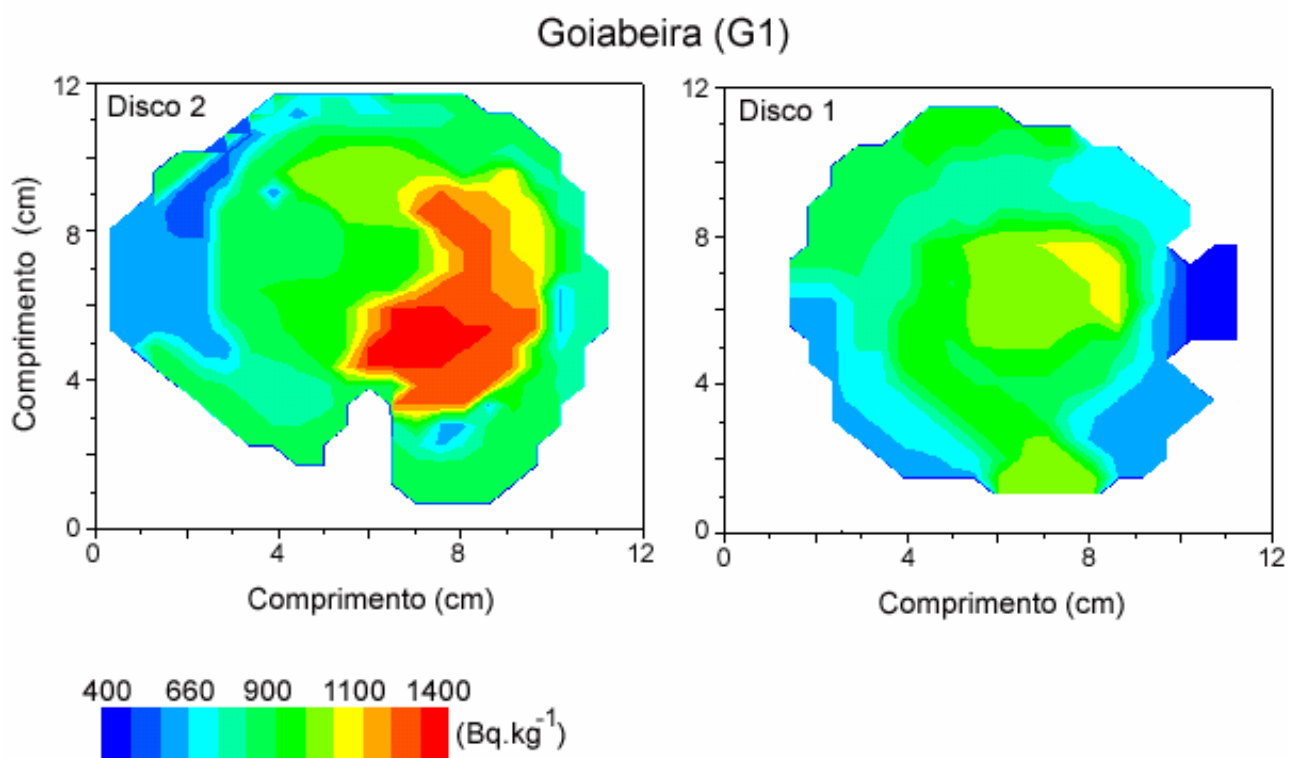


Figura 4.13: Gráficos bidimensionais das concentrações de ^{137}Cs nos discos da goiabeira (G1). Esta figura ilustra a distribuição longitudinal do radionuclídeo.

Um fato interessante é que este aumento da concentração de ^{137}Cs está ocorrendo sempre na direção de um lado preferencial do tronco das duas goiabeiras. Como mencionado anteriormente, este aumento pode ser justificado pela mobilidade do céσιο no interior das árvores. Além disso, estas duas goiabeiras foram cultivadas próximas a um muro (cerca de 30 cm) de aproximadamente 2,5 metros de altura. Desta forma, apenas um dos lados do tronco principal recebia luz solar ao longo do dia. É interessante mencionar que este era o lado do tronco que corresponde aos valores mais altos de concentração de ^{137}Cs .

Outro resultado importante obtido a partir das amostras vegetais coletadas para este trabalho é a distribuição longitudinal propriamente dita. A análise deste tipo de distribuição possibilita identificar as regiões de acúmulo de ^{137}Cs nas diversas partes do vegetal.

A Figura 4.14 ilustra a localização exata de todas as amostras que foram coletadas da goiabeira (G1). As letras azuis indicam as regiões onde foram retirados frutos e folhas. Os números, as posições das amostras de caule. Em seguida, a Tabela 4.3 indica os valores das respectivas concentrações de ^{137}Cs .

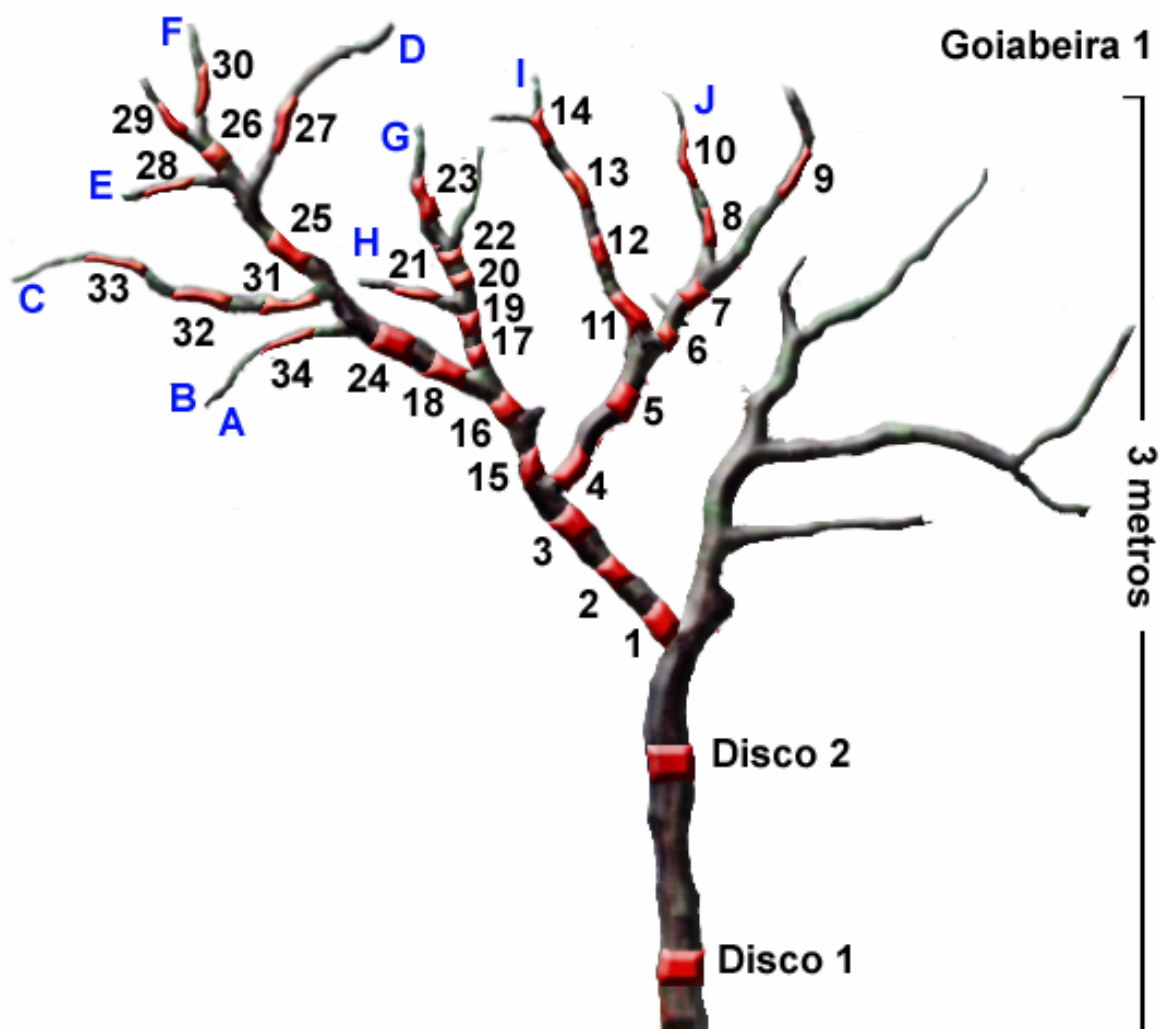


Figura 4.14: Ilustração da goiabeira (G1). As letras azuis de A até J indicam as regiões onde foram coletadas as amostras de folhas e frutos. Os números de 1 até 34 indicam as regiões onde foram coletadas as amostras de tronco. Os valores das concentrações de ^{137}Cs podem ser vistos na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Concentração de ^{137}Cs nas amostras de caule, frutos e folhas da goiabeira (G1), que está ilustrada na Figura 4.14.

Amostra	Concentração de ^{137}Cs (k Bq,kg ⁻¹)		Amostra	Concentração de ^{137}Cs (k Bq,kg ⁻¹)	
	Interior	Casca		Interior	Casca
Disco 1	$(9,0 \pm 0,8) \times 10^{-1}$	-	24	$(8,9 \pm 0,8) \times 10^{-1}$	$1,5 \pm 0,1$
Disco 2	$(7,7 \pm 0,8) \times 10^{-1}$	-	25	$1,2 \pm 0,1$	$2,6 \pm 0,2$
1	$1,2 \pm 0,1$	$2,6 \pm 0,2$	26	$(4,1 \pm 0,4) \times 10^{-1}$	$2,2 \pm 0,2$
2	$2,3 \pm 0,2$	$3,0 \pm 0,2$	27	$1,2 \pm 0,2$	$1,9 \pm 0,2$
3	$2,3 \pm 0,2$	$2,5 \pm 0,2$	28	$(6,9 \pm 0,6) \times 10^{-1}$	$1,9 \pm 0,2$
4	$(5,9 \pm 0,5) \times 10^{-1}$	$2,0 \pm 0,1$	29	$(5,4 \pm 0,5) \times 10^{-1}$	$1,7 \pm 0,2$
5	$(7,2 \pm 0,7) \times 10^{-1}$	$2,2 \pm 0,2$	30	$(4,9 \pm 0,5) \times 10^{-1}$	$1,7 \pm 0,2$
6	$(5,2 \pm 0,5) \times 10^{-1}$	$1,9 \pm 0,2$	31	$(8,0 \pm 0,7) \times 10^{-1}$	$1,7 \pm 0,2$
7	$(4,2 \pm 0,4) \times 10^{-1}$	$1,7 \pm 0,2$	32	$(5,5 \pm 0,5) \times 10^{-1}$	$1,5 \pm 0,1$
8	$(4,2 \pm 0,4) \times 10^{-1}$	$1,6 \pm 0,2$	33	$(5,1 \pm 0,5) \times 10^{-1}$	$1,4 \pm 0,1$
9	$(4,6 \pm 0,4) \times 10^{-1}$	$1,3 \pm 0,1$	34	$(6,8 \pm 0,6) \times 10^{-1}$	$2,1 \pm 0,2$
10	$(3,2 \pm 0,3) \times 10^{-1}$	$1,0 \pm 0,2$			
11	$(6,1 \pm 0,5) \times 10^{-1}$	$1,5 \pm 0,1$		Folhas	Frutos
12	$(8,2 \pm 0,7) \times 10^{-1}$	$1,8 \pm 0,1$	A	$1,8 \pm 0,2$	$1,9 \pm 0,2$
13	$(4,9 \pm 0,4) \times 10^{-1}$	$1,4 \pm 0,2$	B	$2,4 \pm 0,2$	$2,0 \pm 0,2$
14	$(3,6 \pm 0,3) \times 10^{-1}$	$1,3 \pm 0,1$	C	$1,9 \pm 0,2$	$1,8 \pm 0,2$
15	$(2,5 \pm 0,2) \times 10^{-1}$	$2,5 \pm 0,2$	D	$2,4 \pm 0,2$	$1,9 \pm 0,2$
16	$1,1 \pm 0,1$	$2,7 \pm 0,2$	E	$3,2 \pm 0,3$	$2,4 \pm 0,2$
17	$1,4 \pm 0,1$	$2,1 \pm 0,2$	F	$2,3 \pm 0,2$	-
18	$1,4 \pm 0,1$	$2,3 \pm 0,2$	G	$1,5 \pm 0,1$	$1,5 \pm 0,1$
19	$(8,0 \pm 0,7) \times 10^{-1}$	$2,1 \pm 0,2$	H	$1,9 \pm 0,2$	$2,1 \pm 0,2$
20	$(8,6 \pm 0,8) \times 10^{-1}$	$1,8 \pm 0,1$	I	$1,9 \pm 0,2$	$1,9 \pm 0,2$
21	$(4,9 \pm 0,4) \times 10^{-1}$	$1,4 \pm 0,1$	J	-	$2,9 \pm 0,2$
22	$(7,4 \pm 0,6) \times 10^{-1}$	$1,8 \pm 0,2$			
23	$(6,0 \pm 0,5) \times 10^{-1}$	$1,9 \pm 0,2$	Raiz	$(8,6 \pm 0,7) \times 10^{-1}$	

De acordo com as informações contidas na Tabela 4.3 e Figura 4.14, nota-se que os maiores valores de atividade específica de ^{137}Cs são observados nas partes mais jovens da goiabeira: folhas, frutos, casca do tronco e galhos verdes. Quando são comparadas amostras de troncos com espessuras semelhantes, apresenta maior concentração de ^{137}Cs aquele que for mais jovem. Esta última informação pode ser obtida analisando-se os valores encontrados no galho que começa a partir dos pontos 15 e 16. Este era um galho da goiabeira (G1) mais novo do que a ramificação que começava a partir dos pontos 4 e 5.

Da mesma forma, a Figura 4.15 ilustra a localização das amostras que foram coletadas para goiabeira (G2). Os valores das respectivas concentrações podem ser vistos na Tabela 4.4.

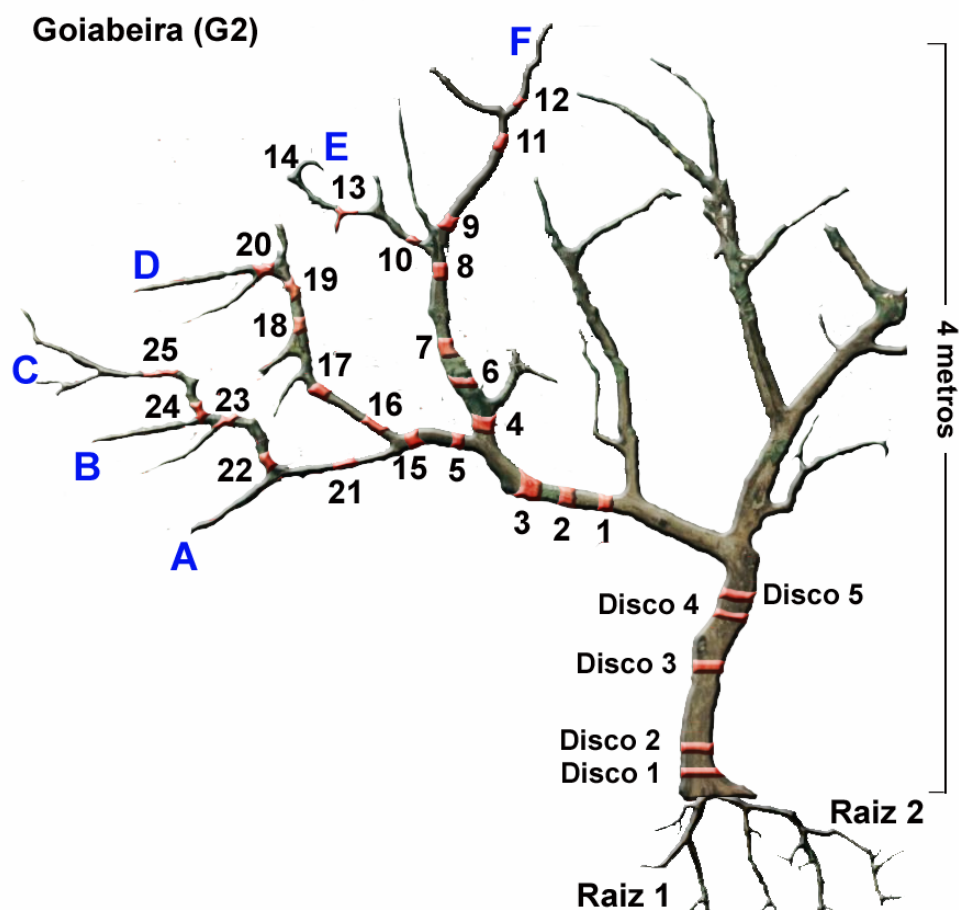


Figura 4.15: Ilustração das posições das amostras vegetais da goiabeira (G2). As letras azuis de A até F indicam as regiões onde foram coletadas as amostras de folhas e frutos. Os números de 1 até 25 indicam as regiões onde foram coletadas as amostras de tronco. Os valores das concentrações podem ser vistos na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Concentração de ^{137}Cs nas amostras de caule, frutos e folhas da goiabeira (G2), que está ilustrada na Figura 4.15

Amostra	Concentração de ^{137}Cs (k Bq,kg ⁻¹)		Amostra	Concentração de ^{137}Cs (k Bq,kg ⁻¹)	
	Interior	Casca		Interior	Casca
Disco 1	1,1 ± 0,1	-	16	1,6 ± 0,1	3,2 ± 0,2
Disco 2	(9,1 ± 0,1) × 10 ⁻¹	-	17	1,2 ± 0,1	3,5 ± 0,2
Disco 3	1,7 ± 0,1	-	18	(9,3 ± 0,9) × 10 ⁻¹	3,5 ± 0,2
Disco 4	1,7 ± 0,1	-	19	(9,2 ± 0,9) × 10 ⁻¹	3,1 ± 0,2
Disco 5	1,7 ± 0,1	-	20	(8,1 ± 0,8) × 10 ⁻¹	3,3 ± 0,3
1	1,9 ± 0,1	3,1 ± 0,2	21	1,1 ± 0,1	4,3 ± 0,4
2	1,6 ± 0,1	3,2 ± 0,2	22	1,3 ± 0,1	4,3 ± 0,4
3	1,7 ± 0,1	3,4 ± 0,2	23	1,1 ± 0,1	4,5 ± 0,4
4	1,9 ± 0,1	2,5 ± 0,1	24	1,6 ± 0,1	4,5 ± 0,3
5	1,8 ± 0,1	3,6 ± 0,2	25	1,5 ± 0,1	4,6 ± 0,5
6	1,3 ± 0,1	2,7 ± 0,2			
7	1,2 ± 0,1	2,5 ± 0,1			
8	1,4 ± 0,1	3,9 ± 0,3			
9	(7,8 ± 0,8) × 10 ⁻¹	2,4 ± 0,2	A	2,4 ± 0,1	-
10	(7,9 ± 0,8) × 10 ⁻¹	2,3 ± 0,1	B	4,6 ± 0,3	4,9 ± 0,4
11	(8,6 ± 0,9) × 10 ⁻¹	2,3 ± 0,1	C	6,5 ± 0,4	6,3 ± 0,4
12	(7,8 ± 0,8) × 10 ⁻¹	-	D	4,2 ± 0,4	-
13	(6,7 ± 0,7) × 10 ⁻¹	2,2 ± 0,1	E	2,5 ± 0,2	2,2 ± 0,1
14	(7,0 ± 0,7) × 10 ⁻¹	2,2 ± 0,1			
15	1,4 ± 0,1	3,7 ± 0,3			
			Raiz 1	1,5 ± 0,1	
			Raiz 2	2,2 ± 0,2	

Resultados análogos são observados para goiabeira (G2), onde novamente os maiores valores de atividade específica de ^{137}Cs são observados na partes mais jovens da goiabeira: folhas, frutos, casca do tronco e galhos verdes e/ou mais novos. Esta última informação pode ser visualizada analisando-se os valores encontrados no galho que começa a partir do ponto 21.

Estas constatações também podem ser observadas para a mangueira (M) e o abacateiro (A1). As Figuras 4.16 e 4.17 ilustram a localização das amostras que foram coletadas na mangueira (M) e no Abacateiro (A1), respectivamente. Os valores das suas concentrações podem ser vistos nas Tabela 4.5 e 4.6 a seguir.

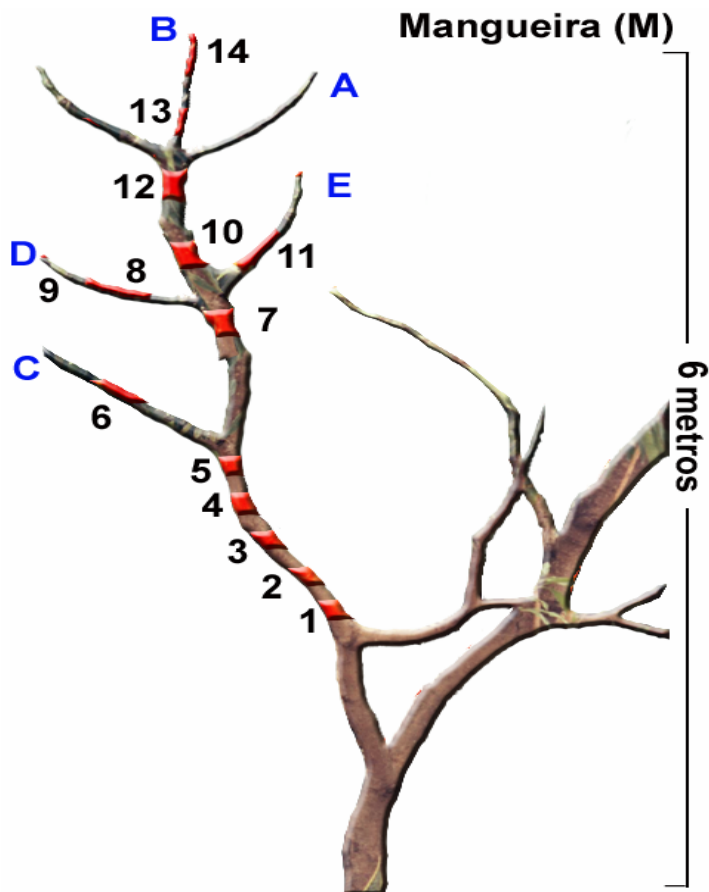


Figura 4.16 Ilustração das posições das amostras vegetais da mangueira (M). As letras azuis de A até E indicam as regiões onde foram coletadas as amostras de folhas e frutos. Os números de 1 até 14 indicam as regiões onde foram coletadas as amostras de tronco. Os valores das concentrações pode ser vistos na Tabela 4.5

Tabela 4.5: Concentração de ^{137}Cs em amostras de caule, frutos e folhas da mangueira (M). Esta tabela pode ser visualizada na Figura 4.16.

Amostra	Concentração de ^{137}Cs (10^2 Bq, kg^{-1})		Amostra	Concentração de ^{137}Cs (10^2 Bq, kg^{-1})	
	Interior	Casca		Interior	Casca
1	$1,3 \pm 0,1$	$2,5 \pm 0,2$	12	$(8,6 \pm 0,8) \times 10^{-1}$	$1,1 \pm 0,1$
2	$1,0 \pm 0,1$	$3,0 \pm 0,3$	13	$1,0 \pm 0,1$	$1,9 \pm 0,2$
3	$1,8 \pm 0,2$	$2,1 \pm 0,3$	14	$(9,3 \pm 0,9) \times 10^{-1}$	$1,4 \pm 0,1$
4	$1,7 \pm 0,2$	$2,0 \pm 0,2$		Folhas	Frutos
5	$1,2 \pm 0,1$	$1,8 \pm 0,2$	A	$2,3 \pm 0,2$	$3,6 \pm 0,3$
6	$(8,6 \pm 0,8) \times 10^{-1}$	$1,9 \pm 0,2$	B	$1,2 \pm 0,1$	$2,7 \pm 0,2$
7	$1,4 \pm 0,1$	$1,8 \pm 0,2$	C	$1,5 \pm 0,1$	-
8	$1,3 \pm 0,1$	$1,8 \pm 0,2$	D	$2,7 \pm 0,2$	-
9	$2,3 \pm 0,2$	$2,7 \pm 0,3$	E	$1,1 \pm 0,1$	-
10	$1,3 \pm 0,1$	$1,7 \pm 0,2$			
11	$1,9 \pm 0,2$	$1,6 \pm 0,2$			

Abacateiro (A1)

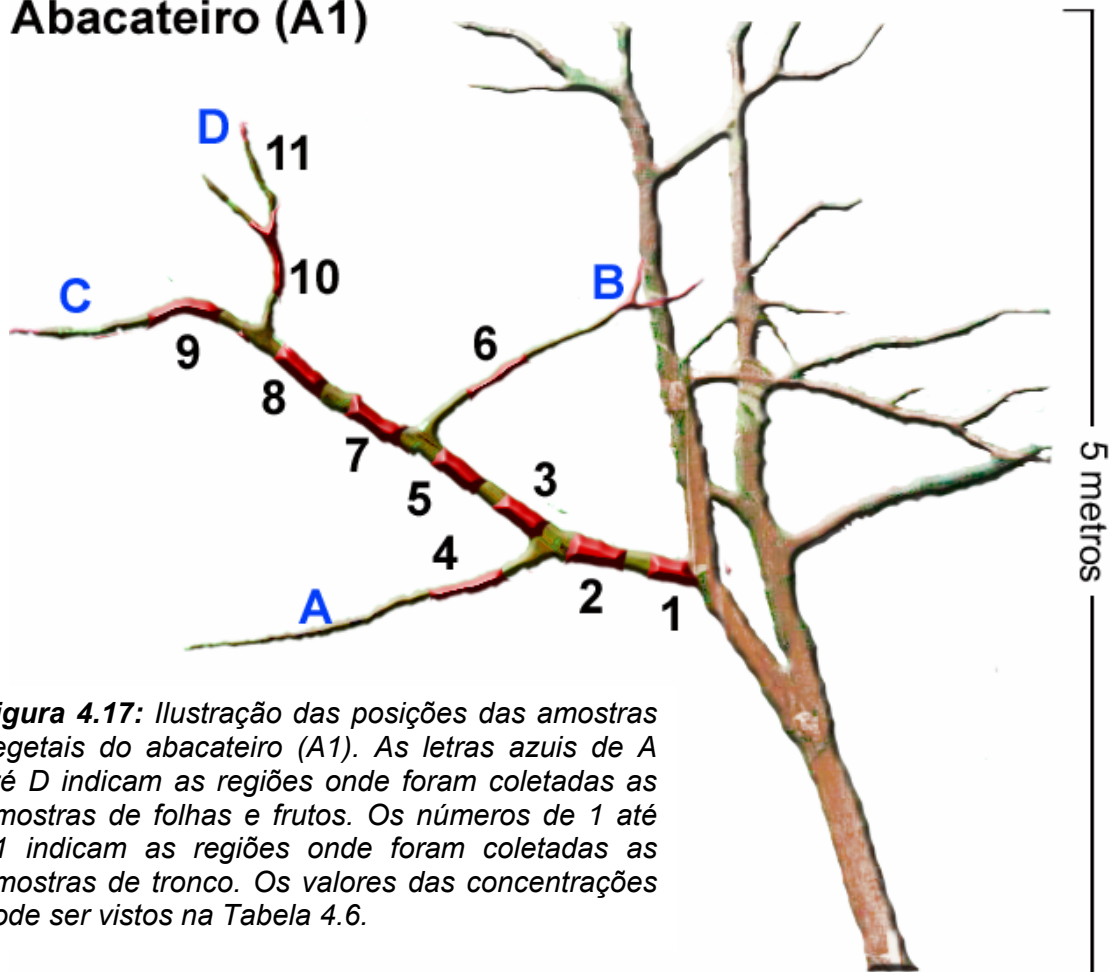


Figura 4.17: Ilustração das posições das amostras vegetais do abacateiro (A1). As letras azuis de A até D indicam as regiões onde foram coletadas as amostras de folhas e frutos. Os números de 1 até 11 indicam as regiões onde foram coletadas as amostras de tronco. Os valores das concentrações pode ser vistos na Tabela 4.6.

Tabela 4.6: Concentração de ^{137}Cs em amostras de caule, frutos e folhas do abacateiro (A1). Esta tabela pode ser visualizada na Figura 4.17.

Amostra	Concentração de ^{137}Cs (k Bq,kg $^{-1}$)		Amostra	Concentração de ^{137}Cs (k Bq,kg $^{-1}$)	
	Interior	Casca		Interior	Casca
1	$(5,4 \pm 0,5) \times 10^{-1}$	$2,0 \pm 0,2$	9	$3,3 \pm 0,3$	$3,6 \pm 0,3$
2	$(7,5 \pm 0,7) \times 10^{-1}$	$2,0 \pm 0,2$	10	$1,2 \pm 0,1$	$2,3 \pm 0,2$
3	$(6,7 \pm 0,6) \times 10^{-1}$	$2,0 \pm 0,2$	11	$1,7 \pm 0,2$	$2,6 \pm 0,2$
4	$1,4 \pm 0,1$	$3,0 \pm 0,2$		Folhas	Frutos
5	$1,1 \pm 0,1$	$2,2 \pm 0,2$	A	$1,4 \pm 0,1$	-
6	$2,2 \pm 0,2$	$3,1 \pm 0,2$	B	$1,3 \pm 0,1$	-
7	$(9,2 \pm 0,8) \times 10^{-1}$	$2,1 \pm 0,2$	C	$1,3 \pm 0,1$	-
8	$1,2 \pm 0,1$	$2,3 \pm 0,2$	D	$1,6 \pm 0,1$	-

Geralmente, a diferenciação entre um galho mais novo e um mais antigo de uma árvore é uma tarefa simples e deve ser feita durante a coleta das amostras. Entretanto, por mais fiel que sejam as ilustrações aqui apresentadas, são perdidas algumas informações que evidenciam a jovialidade do tecido como espessura do galho, grossura da casca entre outras características. Assim, a tabela 4.7 ilustra melhor a diferença de concentração de ^{137}Cs existente entre as diversas partes destes espécimes tropicais. A utilização de médias das concentrações nos galhos, frutos, folhas e cascas fazem com que fique mais evidente o fenômeno indicado por este mapeamento longitudinal nas três espécies estudadas.

Tabela 4.7 : Valores médios da concentração de ^{137}Cs nas partes jovens e nas partes antigas das árvores estudadas neste trabalho. Os números em azul e vermelho representam as posições das amostras no caule de cada uma das espécies. Estas posições podem ser vistas nas figuras 4.14 a 4.17. Os valores entre parênteses são desvios padrões da média.

Árvore	Partes	Valores médios da concentração de ^{137}Cs (kBq.kg ⁻¹)	
		Jovem 16 – 20 e 21 - 25	Antiga 8 ,9, 11, 12 e 10, 13, 14
Goiabeira 2 (G2)	Tronco (interior)	1,2 (0,2)	0,8 (0,1)
	Casca	3,9 (0,6)	2,3 (0,1)
	Folhas	4,7 (0,9)	2,4 (0,2)
	Frutos	5,6 (0,7)	2,2 (0,2)
Goiabeira 1 (G1)	Tronco (interior)	0,7 (0,2)	0,7 (0,3)
	Casca	1,8 (0,3)	1,7 (0,3)
	Folhas	2,3 (0,3)	1,8 (0,2)
	Frutos	2,0 (0,2)	2,1 (0,4)
Mangueira (M)	Tronco (interior)	2,0 (0,2)	1,0 (0,1)
	Casca	2,7 (0,1)	1,7 (0,3)
	Folhas	2,5 (0,2)	1,2 (0,1)
	Frutos	3,6 (0,2)	2,7 (0,2)
Abacateiro (A1)	Tronco (interior)	3,3 (0,3)	1,8 (0,4)
	Casca	3,6 (0,3)	2,7 (0,3)
	Folhas	2,3 (0,2)	1,4 (0,2)

Complementando a tabela anterior, a Figura 4.18 apresenta uma outra maneira de identificar o acúmulo de ^{137}Cs nas partes mais jovens destes vegetais. Desta vez, pode-se observar que a concentração média do radionuclídeo é maior tanto nas folhas quanto nos frutos. As folhas e frutos sempre são mais jovens quando comparadas com os galhos e cascas onde estão situadas.

Também é interessante observar que, por exemplo, embora a mangueira esteja sendo cultivada num solo com concentração de ^{137}Cs superior ao solo da goiabeira (G1), suas folhas, frutos e galhos apresentam uma atividade específica de ^{137}Cs significativamente inferior. Este fato, como mencionado anteriormente está refletido no fator de transferência solo-planta para estas duas espécies de árvores frutíferas tropicais.

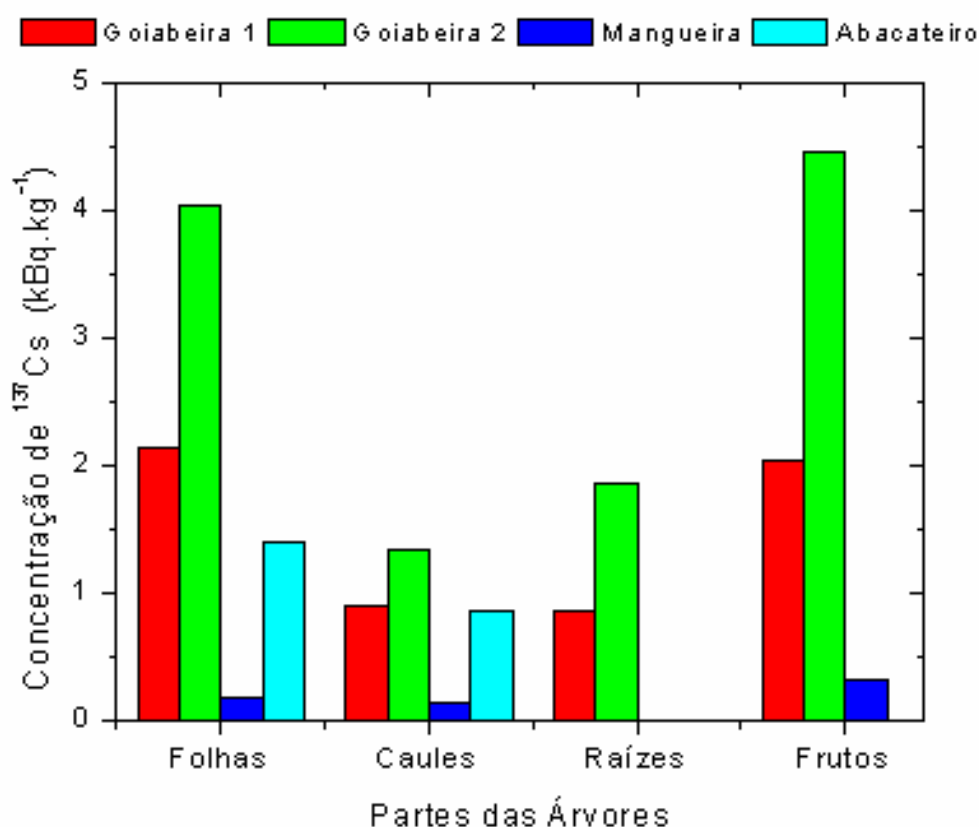


Figura 4.18: Gráfico das concentrações de ^{137}Cs nas diferentes partes da goiabeira (G1), em vermelho, da goiabeira (G2), em verde, da mangueira (M), em azul escuro, e do abacateiro (A1), em azul claro.

4.5 Comparação entre ^{137}Cs e o ^{40}K

Conforme mencionado no Capítulo 3, o potássio é um nutriente essencial para os vegetais e o céσιο possui a habilidade de substituí-lo durante o processo de absorção de nutrientes. Esta constatação tem sido observada em alguns trabalhos, onde a distribuição radial de ^{137}Cs em anéis de árvores possuía um comportamento similar à distribuição radial do ^{40}K [Hass, 1995]. Assim, este resultado poderia estar correlacionado com o comportamento dinâmico do transporte de nutrientes no interior dos vegetais.

Recentemente, Simon e colaboradores [Simon, 2002] ao estudarem as concentrações de ^{137}Cs e ^{40}K em sete espécies de plantas nativas das Ilhas Marshall (local utilizado pelos EUA para a realização de testes de armas nucleares durante as décadas de 40 e 50) observaram que, enquanto havia uma correlação entre o aumento da concentração de ^{137}Cs no solo com partes do vegetal, o mesmo comportamento não se verificava para o ^{40}K . Embora fosse possível aumentar a concentração do ^{40}K no solo, não era observado um aumento da concentração deste radionuclídeo no interior do vegetal na mesma proporção do aumento de ^{137}Cs . Desta forma, a absorção do ^{40}K pelo vegetal parecia ser limitada por algum mecanismo.

Com o objetivo de comparar estas constatações relatadas na literatura com o transporte de nutrientes no interior de árvores frutíferas tropicais, foram realizadas algumas medidas simultâneas da concentração de ^{137}Cs e ^{40}K nas diferentes partes das goiabeiras (G1) e (G2), do abacateiro (A1) e da mangueira (M) e no interior de um disco para cada uma das goiabeiras (G1) e (G2). Devido a problemas com limite de detecção do sistema experimental utilizado (detectores NaI), não foi possível medir a concentração de ^{40}K com a mesma quantidade em massa das amostras utilizadas para a determinação de ^{137}Cs , conforme apresentado em figuras anteriores. No caso das medidas já apresentadas, foram utilizadas cerca de 2 a 4 gramas de material para cada amostra estudada. No caso de medidas de ^{40}K , foi necessário usar cerca de quatro a cinco vezes mais massa para que a concentração de potássio pudesse ser determinada. Esta perda na resolução torna-se mais evidente para as amostras de discos. Assim, para o disco escolhido da goiabeira (G2) foi

possível realizar medidas apenas para cada metade de um anel de crescimento (menos para os dois anéis centrais). Para a goiabeira (G1), foi possível realizar somente medidas completas para os quatro anéis externos. Assim, a Figura 4.19, (a) e (b), apresenta os valores das concentrações de ^{137}Cs e ^{40}K para os discos de número 2 da goiabeira (G2) e da goiabeira (G1), respectivamente. E a Figura 4.20 apresenta os valores das concentrações destes elementos para as diferentes partes dos quatro vegetais analisados.

De acordo com estas figuras, é possível observar que a concentração de ^{40}K aumenta com o aumento da concentração de ^{137}Cs nos anéis mais externos dos discos das duas goiabeiras. Entretanto, à medida que a concentração de ^{137}Cs tem um aumento mais acentuado nos anéis mais internos a concentração de ^{40}K tende a saturar, de tal forma que a absorção do ^{40}K pelo vegetal parece ser limitada por algum mecanismo, como o observado por Simon e colaboradores.

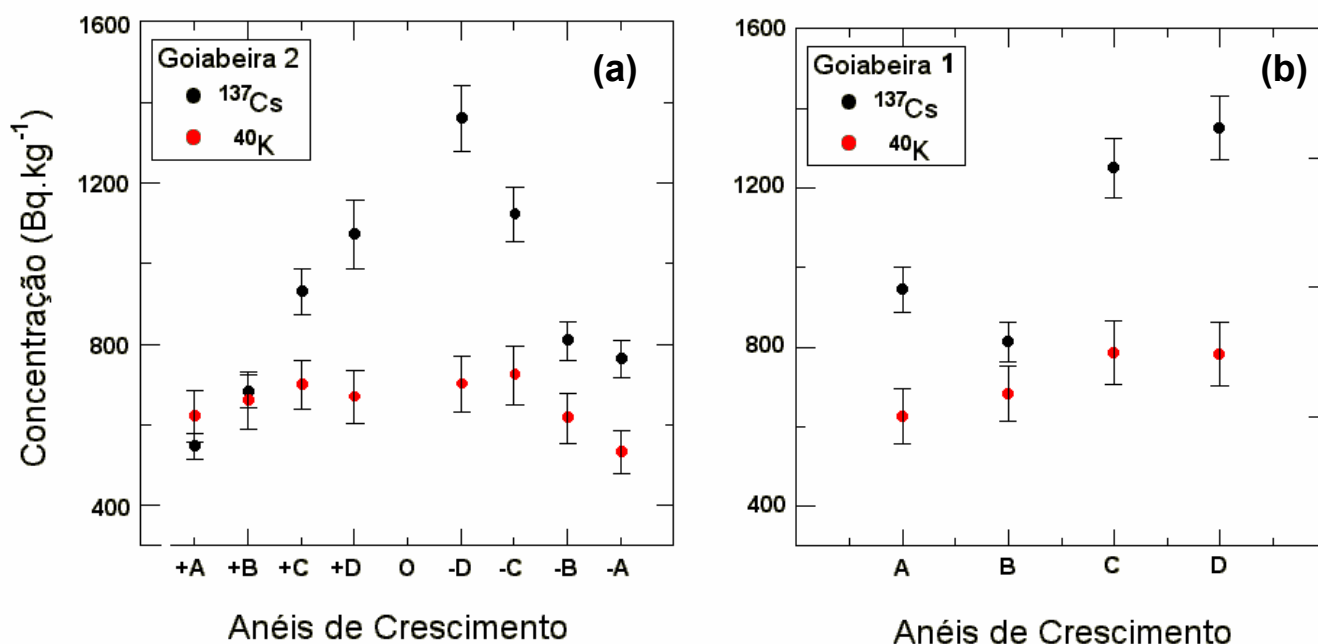


Figura 4.19: (a) Concentrações de ^{137}Cs e ^{40}K para os quatros anéis de crescimento do disco 2 da goiabeira (G2). Os índices A, B, C e D representam os anéis e os valores (+) indicam o lado esquerdo do anel e os valores (-) indicam o lado direito do anel. O representa o centro do disco. Em (b), as concentrações de ^{137}Cs e ^{40}K para os quatros anéis de crescimento do disco 2 da goiabeira (G1). Os índices A, B, C e D representam os anéis de crescimento da árvore.

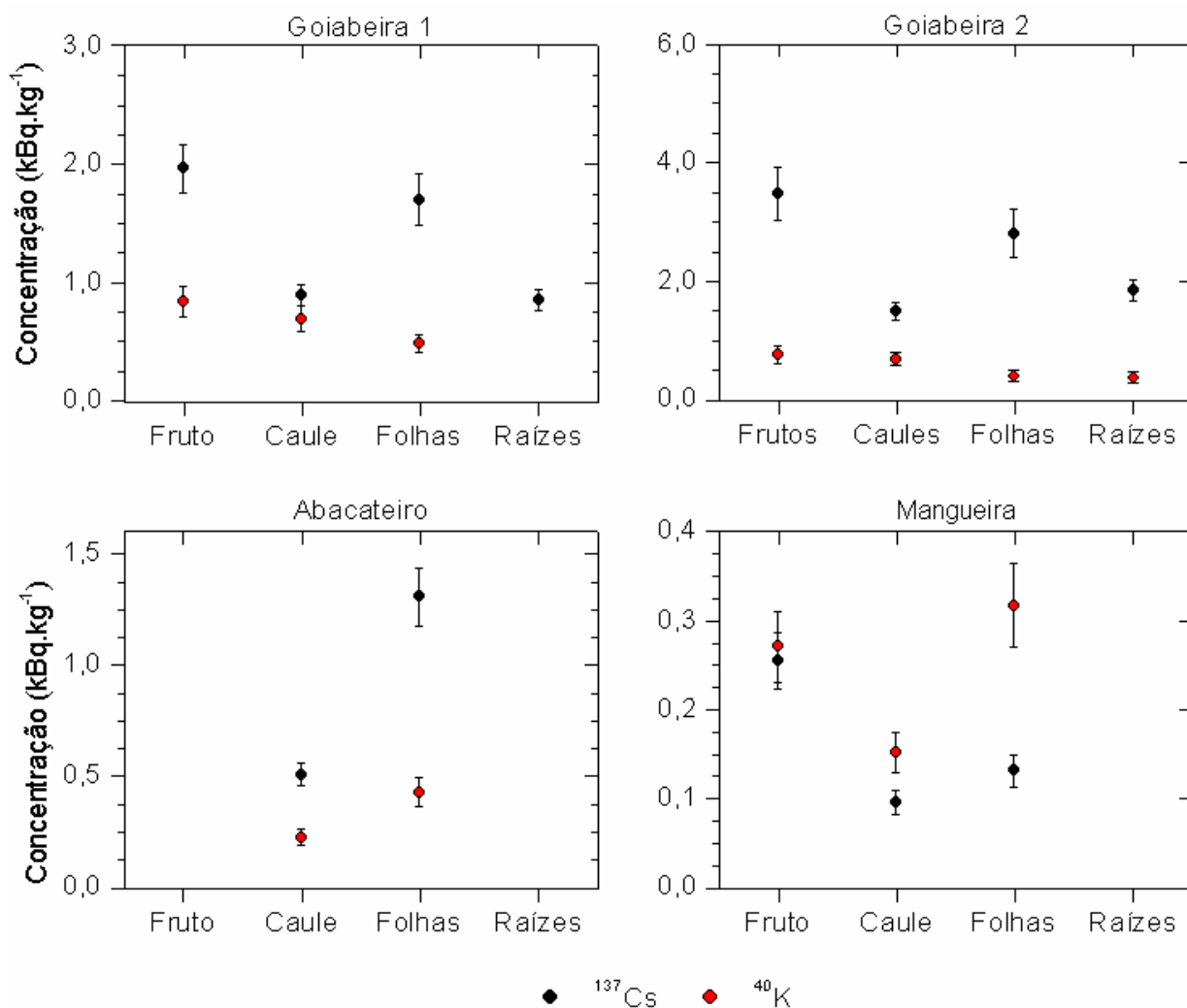


Figura 4.20: Concentrações de ^{137}Cs e ^{40}K em diferentes partes dos vegetais tropicais analisados neste trabalho.

Assim, nota-se que a utilização do césio como um rastreador do transporte de nutrientes não é um sistema de solução simples. Uma hipótese é que o íon de césio possa estar competindo com a absorção de mais de um nutriente, como é o caso do íon NH_4^+ . Ou ainda, para que este radionuclídeo possa ser utilizado como um rastreador, sua concentração no vegetal não deve ultrapassar um valor limite. De qualquer forma, esta continua a ser uma interessante questão em aberto para trabalhos futuros.

Capítulo 5

Conclusões

Os resultados apresentados neste trabalho sobre o estudo da distribuição de ^{137}Cs em árvores frutíferas tropicais indicam que este radionuclídeo apresenta uma grande facilidade para ser absorvido do solo pelas raízes e migrar pelo tronco, galhos, folhas e frutos destes vegetais, onde seu transporte para o interior do vegetal é tão mais acentuado quanto maior for a sua concentração no solo.

Este fato reflete na existência de uma correlação entre a concentração de ^{137}Cs no solo com partes do vegetal, sendo fortemente ligada às características individuais do solo e da planta. Embora alguns trabalhos possam sugerir que esta correlação não seja linear [Simon, 2002], normalmente é assumida uma condição de equilíbrio estático do sistema solo-planta e uma simples equação matemática de proporcionalidade pode ser atribuída para descrever a transferência de elementos radioativos do solo para vegetais [IAEA, 1994].

Assim, os fatores de transferência solo-planta obtidos neste trabalho revelaram que das três árvores frutíferas tropicais cultivadas no mesmo tipo de solo, a mangueira é a que apresenta um fator com uma ordem de grandeza menor em relação à goiabeira e ao abacateiro. Ou seja, o consumo elevado de uma mesma quantidade de goiabas ou de abacates cultivadas no local estudado poderia produzir danos mais sérios para a saúde humana quando comparado com o mesmo consumo de mangas.

A análise do transporte e distribuição longitudinal de ^{137}Cs no interior dos vegetais tropicais revelou que a atividade específica deste radionuclídeo era mais elevada nas partes mais jovens do vegetal: folhas, frutos, casca do tronco e galhos verdes ou mais novos.

A análise bidimensional de diagramas da distribuição radial do ^{137}Cs pelos anéis de crescimento, observados em vários discos coletados do tronco principal de duas goiabeiras, permitiram a obtenção de resultados mais precisos e conclusivos do que as tradicionais análises unidimensionais, uma vez que foi possível observar que, dentro de um mesmo anel, existe uma considerável variação na concentração de ^{137}Cs . Ou seja, pode-se dizer que não ocorre uma distribuição homogênea ou simétrica desta substância radioativa dentro de cada anel de crescimento. Além disso, foi possível observar que a distribuição do ^{137}Cs sofre alterações significativas conforme a posição do disco em relação à sua altura do solo.

A análise dos discos destas goiabeiras revelou a existência de um aumento da concentração de ^{137}Cs no centro dos discos mais próximos ao solo, enquanto que para os discos mais altos há um acúmulo do radionuclídeo em um dos lados. Além disso, os discos mais próximos ao solo apresentavam regiões de acúmulo de ^{137}Cs com atividades específicas menores quando comparadas com regiões de acúmulos nos discos mais altos. Também foi possível observar, que nos discos mais altos era mais evidente a migração do radionuclídeo para um dos lados do caule. Todos estes resultados evidenciam a grande mobilidade deste radionuclídeo no interior de vegetais.

Um fato curioso observado foi que este aumento da concentração de ^{137}Cs ocorria sempre na direção de um lado preferencial do tronco das duas goiabeiras. Uma vez que estas duas goiabeiras recebiam iluminação solar preferencialmente de um dos lados do tronco principal, é interessante mencionar que este era o lado do tronco que corresponde aos valores mais altos de concentração de ^{137}Cs .

Tem sido mencionado em vários trabalhos [Shaw, 1991; Hellen, 1991; Kudo, 1993] que o potássio é um nutriente essencial para os vegetais e que o céσιο possui a habilidade de substituí-lo durante o processo de absorção de nutrientes. Assim, esta constatação permitiria supor a existência de uma

correlação entre a distribuição do ^{137}Cs com o comportamento dinâmico do transporte de nutrientes no interior dos vegetais.

Dentro deste contexto, foram realizadas algumas medidas simultâneas da concentração de ^{40}K e ^{137}Cs , no interior de dois discos das duas goiabeiras. Estas medidas sofreram algumas limitações experimentais. A principal foi devido ao limite de detecção, uma vez que cada anel de crescimento presente nos discos analisados não apresentava uma quantidade em massa significativa para que fosse possível fazer sua medição de ^{40}K com um detector NaI, com a mesma quantidade de amostras com que foram realizadas as medidas de ^{137}Cs . Assim, apenas alguns discos foram analisados.

De qualquer modo, foi possível observar um aumento da concentração de ^{40}K com o aumento da concentração de ^{137}Cs . Entretanto, à medida que a concentração de ^{137}Cs adquiria valores mais acentuados, a concentração de ^{40}K tendia a saturar, de tal forma que a absorção do ^{40}K pelo vegetal parecia ser limitada por algum mecanismo.

Uma conclusão possível seria que, para que o ^{137}Cs seja utilizado como um rastreador, a concentração deste radionuclídeo no vegetal não deve ultrapassar um valor limite. Entretanto, esta não é uma solução simples e outros fatores devem ser levados em conta. Dentre eles, podem ser citados a competição com outros nutrientes ou até mesmo a inclusão de modelos que descrevam o metabolismo destes nutrientes. Estes “ingredientes” podem alterar o comportamento do ^{40}K em relação ao ^{137}Cs .

Os íons NH_4^+ , K^+ , Rb^+ e Cs^+ formam uma série homóloga, na qual apresentam um grande grau de semelhanças físico-químicas quando comparados com quaisquer outras séries de íons, com exceção dos halogênios. O íon NH_4^+ é uma importante fonte de nitrogênio para os vegetais. Uma vez que o íon de césio (Cs^+) possui características eletrônicas semelhantes ao potássio e o amônio, talvez este fato leve a uma competição entre estes íons quando se trata de absorção pelas raízes e o posterior transporte no interior do vegetal. Desse modo, seria interessante compreender qual seria o comportamento do ^{137}Cs em relação à concentração de nitrogênio no interior do vegetal.

Desta forma, o estudo da utilização do ^{137}Cs como um rastreador do transporte de nutrientes precisa ser feito com mais detalhes, continuando como uma interessante questão em aberto para trabalhos futuros.

Este será meu próximo tema a ser investigado...

Referências Bibliográficas

- [Anjos, 2000] R. M. Anjos, A. Facure, K. C. Damasio Macario, E. M. Yoshimura, J. A. P. Brage, E. M. Terra, H. Tompakow, P. R. S. Gomes, C. E. Alhanati, S. N. M. Cardoso, M. D. N. Santoro (2000) *“The Study of Goiânia Radiological Accident in the Modern Physics Teaching”*, Rev. Bras. de Ensino de Física **22**, 60-68;
- [Anjos, 2001] R. M. Anjos, A. Facure, E. L. N. Lima, P. R. S. Gomes, M. S. Santos, J. A. P. Brage, E. Okuno, E. M. Yoshimura and N. K. Umisedo (2001) *“Radioactivity Teaching: Environmental Consequences of the Radiological Accident in Goiânia (Brazil)”*, Am. J. Phys. **69**, 377-381;
- [Anjos, 2002] R. M. Anjos, N. K. Umisedo, A. Facure, E. M. Yoshimura, P. R. S. Gomes and E. Okuno (2002) *“Goiânia: 12 years after the ¹³⁷Cs radiological accident”*. Radiat. Prot. Dosim. 101(1-4), 201-204;
- [Anjos, 2004] R. M. Anjos, E. Okuno, P. R. S. Gomes, R. Veiga, L. Estellita, L. Mangia, D. Uzêda, T. Soares, A. Facure, J. A. P. Brage, B. Mosquera, C. Carvalho, A. M. A. Santos (2004). *“Radioecology teaching: evaluation of the background radiation levels from areas with high concentrations of radionuclides in soil”*. European Journal of Physics 25 (2), 133-144;
- [Ávila, 1998] R. Ávila, L. Moberg, L. Hubbard (1998) *“Modelling of radionuclide migration in Forest ecosystems”*. A Literature review. Swedish Radiation Protection Institute. SSI Report 98:07;
- [Brown 1981] R. B. Brown, N. H. Cutshall and G. F. Kling (1981) *“Agricultural erosion indicated by ¹³⁷Cs redistribution: I. Levels and distribution of ¹³⁷Cs activity in soils”*. Soil Sci. Soc. Am. J., 45: 1184–1190;
- [Carini, 1997] F. Carini, E. Lombi (1997) *“Foliar and Soil Uptake of ¹³⁴Cs and ⁸⁵Sr by Grape Vines”*. The Science of the Total Environment 207. 157 – 164;
- [Carini, 1999] F. Carini (2001) *“Radionuclide transfer from soil to fruit”*. Journal of Environmental Radioactivity 52. 237 – 279;
- [Du, 1998] M. Du, H. Yang, Q. Chang, K. Minami, and T. Hatta (1998) *“Caesium-137 fallout depth distribution in different soil profiles and significance for estimating soil erosion rate”* Sciences of Soils 3:3;

[Eisberg, 1994] Robert Martin Eisberg (1961) *“Fundamentos da Física Moderna”*. Ed. Guanabara Dois S. A.;

[Facure, 2001a] A. Facure, N. K. Umisedo, E. Okuno, E. M. Yoshimura, P. R. S. Gomes and R. M. Anjos (2002) *“Measurements performed in Goiânia after A New intervention Action in 2001”*. *Radiat. Prot. Dosim.* **98(4)**, pp 433-435;

[Facure, 2001b] A. Facure; N. K. Umisedo; E. Okuno; E. M. Yoshimura; P. R. S. Gomes; R. M. Anjos (2001) *“Remains of ¹³⁷Cs contamination in the city of Goiânia, Brazil”*, *Radiat. Prot. Dosim.* **95(2)**, 165-171;

[Facure, 2001c] A. Facure, dissertação de mestrado – IF-UFF (2001);

[Fogh, 2001] Christian Lange Fogh, Kasper Grann Andersson (2001) *“Dynamic behaviour of ¹³⁷Cs contamination in trees of the Briansk region, Russia”*, *The Science of the Total Environment* 269, 105-115;

[Garcia-Oliva, 1995] F. Garcia-Oliva, R. Martinez-Lugo and J. M. Maass (1995) *“Long-term net soil erosion as determined by ¹³⁷Cs redistribution in an undisturbed and perturbed tropical deciduous forest ecosystem”*. *Geoderma*, 68: 135–147;

[Grissino, 2004] Página da web: <http://web.utk.edu/~grissino/>

[HASL300, 1997] HASL300, 1997 Manual, Página da web: <http://www.eml.doe.gov/>

[Hass, 1995] G.Hass, A. Muller (1995) *“Radioecological investigations on the tree rings of spruce”*. *The Science of the Total Environment.* 173/174, 393-397;

[Hellen, 1991] Hellen E. Jones, A. F. Harrison, Jan M. Poskitt, J. D. Roberts & Gill Clint (1991) *“The Effect of Potassium Nutrition on ¹³⁷Cs Uptake in Two Upland Species”*. *Journal of Environ Radioactivity*, 14. 279-294;

[HP, 1991] Health Physics, Special Issue (1991) *“The Goiânia Radiation Accident”*. *Health Phys.* 60;

[HP, 1997] Health Physics, *“Consequences of Nuclear Testing in the Marshal Islands”* (*Health Phys.* **73**, Special Issue, NY, 1997) and [http://www.bikiniatoll.com](http://www.bikiniatoll.com;);

[IAEA, 1983] IAEA, *“Biological Effects of Low-Level Radiation”* (International Atomic Energy Agency, Vienna, **1983**);

[IAEA,1988] IAEA. *The Radiological Accident in Goiânia*. (Vienna: International Atomic Energy Agency,**1988**);

[IAEA, 1989] – International Atomic Energy Agency. Measurement of Radionuclides in Food and the Environment. (Vienna: IAEA Technical Report Series, No. 295, p.22-31, **1989**);

[IAEA, 1994] *Handbook of parameter value for the prediction of radionuclide transfer in temperate environments*. IAEA Technical Report Series N° 364, Vienna: IAEA;

[Knoll,1979] – G. F. Knoll. Radiation Detection and Measurement. New York: John Wiley and Sons, **1979**;

[Kudo, 1993] A. Kudo, T. Suzuki, D. C. Santry, Y. Mahara, S. Miyahara & J. P. Garrec (**1993**) *“Effectiveness of Tree Rings for Recording Pu History at Nagasaki, Japan”*. J. Environmental Radioactivity 21. 55-63;

[Lance, 1986] J. C. Lance, S. C. McIntyre, J. W. Naney and S. S. Rousseva (**1986**) *“Measuring sediment movement at low erosion rates using caesium-137”*. Soil Sci. Am. J., **50**: 1303–1309;

[Livens, 1988] F. R. Livens & J. P. Loveland (**1988**) *“ The Influence of Soil Properties on the Environmental Mobility of Caesium in Cumbria”*. Soil Use and Management, 4(3), 69-75;

[Loughran, 1987] R. J. Loughran, B. L. Campbell and D. E. Walling (**1987**) *“Soil erosion and sedimentation indicated by caesium-137”*. Jackmoor Brook catchment, Devon,

[McCallan, 1980] M. E. McCallan, B. M. O'Leary and C. W. Rose (**1980**) *“Redistribution of caesium-137 by erosion and deposition on an Australian soil”*. Aust. J. Soil Res., 18: 119–128;

[Momoshima, 1994] N. Momoshima e E. A. Bondietti (**1994**) *“The Radial Distribution of ⁹⁰Sr and ¹³⁷Cs in Trees”*. J. Environ. Radioactivity 22. 93-109;

[ORTEC, 1984] – EG&G ORTEC. Experiments in Nuclear Science AN34, Laboratory Manual. Tennessee: EG&G ORTEC, 1984, 170p;

[Quine, 1990] D. E. Walling and T. A. Quine (1990) "Calibration of caesium-137 measurements to provide quantitative erosion rate data". Land Degradation and Rehabilitation, 2: 161–175;

[Quine, 1991] D. E. Walling and T. A. Quine (1991) "Use of 137Cs measurements to investigate soil erosion on arable fields in the UK: potential applications and limitations". J. Soil Sci., 42: 147–165;

[Quine, 1992] D. E. Walling and T. A. Quine (1992) "The use of caesium -137 measurements in soil erosion surveys. In: Erosion and Sediment Transport Monitoring Programmes in River Basins", IAHS Publication, 210: 143–152;

[Quine, 1994] T. A. Quine, A. Navas, D. E. Walling and J. Machin (1994) "Soil erosion and redistribution on cultivated and uncultivated land near Las Bardenas in the central Ebro River basin, Spain". Land Degradation and Rehabilitation, 5: 41–55;

[Ribas,1994] – R. V. Ribas. *Vaxpak Manual*. São Paulo: IFUSP, 1994;

[Ribas,1998] – R. V. Ribas. *Comunicação Particular*, São Paulo: IFUSP, 1998;

[Sabbarese, 2002] C. Sabbaresea, L. Stellatoa, M.F. Cotrufoa, A. D'Onofrioa, A. Ermicea, F. Terrasia, S. Alfierib (2002) "Transfer of 137Cs and 60Co from irrigation waterto a soil–tomato plant system" Journal of Environ. Radioactivity, 61. 21–31;

[Shaw, 1991] G. Shaw & J. N. Bell (1991) "Competitive Effects of Potassium and Ammonium on Caesium Uptake Kinetics in Wheat". Journal of Environ. Radioactivity, 13. 283-296;

[Shultz, 1965] R. K. Shultz (1965) "Soil Chemistry of Radionuclides" Health Physics, 11. 1317-1324;

[Simon, 2002] S. L. Simon, J. C. Grahan and S.D. Terp (2002) "Uptake of 40K and 137Cs in Native Plants of the Marshall Islands", Journal of Environ. Radioactivity, 59. 223-243;

[Takenaka, 1998] Chisato Takenaka, Yuichi Onda, Yasunori Hamajima (1998) "Distribution of Cesium-137 in Japanese Forest Soil: Correlation with the Contents of Organic Carbon" . Science of Total Environment 222. 193-199;

[UNSCEAR, 2000] UNSCEAR. *Sources and Effects of Ionizing Radiation* (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, New York, **1993** and **2000**);

[Walling, 1990a] D. E. Walling and T. A. Quine (**1990**) “*Calibration of caesium-137 measurements to provide quantitative erosion rate data*”. *Land Degradation and Rehabilitation*, **2**: 161–175;

[Walling, 1990b] X. B. Zhang, D. L. Higgitt and D. E. Walling (**1990**) “*A preliminary assessment of the potential for using caesium-137 to estimate rates of soil erosion in the Loess Plateau of China*”. *Hydrological Sciences J.*, **35**: 243–252;

[Walling, 1991] D. E. Walling and T. A. Quine (**1991**) “*Use of ¹³⁷Cs measurements to investigate soil erosion on arable fields in the UK: potential applications and limitations*”. *J. Soil Sci.*, **42**: 147–165;

[Walling, 1992] D. E. Walling and T. A. Quine (**1992**) “*The use of caesium-137 measurements in soil erosion surveys*”. In: *Erosion and Sediment Transport Monitoring Programmes in River Basins*, IAHS Publication, **210**: 143–152;

[Wasserman, 1998] M. A. Wasserman, E. V. Silva Filho e Villas-Boas (**1998**) “*Geochemical Partitioning Related to Soil-Plant Transfer Factor of Caesium-137 in Oxisoils of Tropical Areas*”. In: *Environmental Geochemistry in the tropics*. Germany;

[Wasserman, 2002] M. A. Wasserman, D. V. Perez e A. Bourg (**2002**) “*Behaviour of ¹³⁷Cs in Some Brazilian Oxisoils*”. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, vol. 33, p.1335 – 1349;

[Yang, 1998] H. Yang, Q. Chang, M. Du, K. Minami and T. Hatta (**1998**) “*Quantitative model of soil erosion rate using ¹³⁷Cs for uncultivated soil*”. *Soil Sci.*, **163**: 248–257;